

**Untersuchung von Oberflächenreflexen
zur Gewinnung der beleuchtenden Lichtfarbe**

Diplomarbeit

Fakultät für Informations-, Medien- und Elektrotechnik
der Fachhochschule Köln
Institut für Medien und Phototechnik

Autorin

Karin Kolbe

Köln

Mat.-Nr. 11027543

Referent: Prof. Dr.-Ing. Gregor Fischer

Koreferent: Prof. Dr. rer. nat. Manfred Schrey

Köln, im Februar 2007

**Analysis of Surface Reflection
to detect the Colour of the Illumination**

Diploma Thesis

Faculty of Information, Media and Electrical Engineering

University of Applied Sciences Cologne

Institute of Media and Phototechnology

Author

Karin Kolbe

Cologne

Mat.-Nr. 11027543

First Reviewer: Prof. Dr.-Ing. Gregor Fischer

Second First Reviewer: Prof. Dr. rer. nat. Manfred Schrey

Cologne, February 2007

Kurzbeschreibung

Titel: Untersuchung von Oberflächenreflexen zur Gewinnung der beleuchtenden Lichtfarbe

Autor: Karin Kolbe

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Gregor Fischer / Prof. Dr. rer. nat. Manfred Schrey

Zusammenfassung:

In dieser Diplomarbeit wird ein neues Verfahren für den automatischen Weißabgleich einer digitalen Kamera beschrieben. Das Verfahren bestimmt die beleuchtende Lichtfarbe durch Messung von polarisierten Reflexen. Die Arbeit untersucht mit diesem Verfahren Reflexe an verschiedenen Oberflächen. Herausgearbeitet werden die kritischen Situationen der Anwendung. Dies geschieht im Hinblick auf die spätere Optimierung des Verfahrens.

Sperrvermerk: Die Arbeit unterliegt einem Sperrvermerk bis 28.2.2009

Stichwörter: digitale Kamera, Weißabgleich, Lichtfarbe, Polarisation

Datum: Februar, 2007

Abstract

Title: Analysis of Surface Reflection to detect the Colour of the Illumination

Author: Karin Kolbe

Reviewers: Prof. Dr.-Ing. Gregor Fischer / Prof. Dr. rer. nat. Manfred Schrey

Summary:

This thesis addresses a novel method for automatic whitebalancing with a digital still camera. The new technique determines the colour of illumination on various surfaces by measuring their polarized reflection. This investigation especially elaborates the critical situations encountered during the aforementioned process in order to provide a groundwork for possible future developments of the procedure.

Remark of closure: This thesis is closed until 28.2.2009

Key words: Digital Still Camera, White Balance, Colour Constancy, Colour of the Illumination, Polarization

Date: February, 2007

Inhaltsangabe

Inhaltsangabe	1
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	4
2.1 Polarisation	4
2.1.1 Licht	4
2.1.2 Unpolarisiertes Licht	4
2.1.3 Linear polarisiertes Licht	5
2.1.4 Entstehung von linear polarisiertem Licht	5
2.1.4.1 Polarisation durch Reflexion	6
2.1.4.2 Polarisation durch Streuung	7
2.1.4.3 Polarisation durch Absorption	8
2.2 Oberflächen und Beleuchtungsgeometrie	10
2.2.1 Lichttechnische Größen	10
2.2.2 Absorption und Remission	11
2.2.3 Reflexion	12
2.2.3.1 Gerichtete Reflexion	12
2.2.3.2 Diffuse Reflexion	13
2.2.3.3 Polarisationsgrad	14
2.3 Spektrale Verteilung der Beleuchtung	15
2.3.1 Spektrum elektromagnetischer Strahlung	15
2.3.2 Spektrale Strahlungsverteilung von Lichtquellen	15
2.3.3 Farbtemperatur	15
3 Bildaufzeichnung	18
3.1 Bildaufzeichnung durch das Auge	18
3.1.1 Spektrale Empfindlichkeit des Auges	18
3.1.2 Dreifarbentheorie	19
3.1.3 Farbverarbeitung im Auge	19
3.2 Bildaufzeichnung einer DSC	20
3.2.1 Spektrale Empfindlichkeit eines Bildsensors	20
3.3 Weißabgleich	21
3.3.1 Chromatische Adaptation	22
3.3.2 Weißabgleich einer DSC	22
3.3.2.1 Gray World Algorithm	24
3.3.2.2 White Patch Algorithm	24
4 Neues Verfahren zum automatischen Weißabgleich einer DSC	25
4.1 Prinzip des Verfahrens	25
4.2 Bildaufzeichnung	26
4.3 Differenzbildung und elektronische Weiterverarbeitung	27
4.3.1 Maskierung der beiden unterschiedlich polarisierten Bilder	28
4.3.2 Herstellung des Beleuchtungsbildes	29
4.3.3 Maskierung des Beleuchtungsbildes	30
4.3.4 Bestimmung der Lichtfarbe	31
4.3.5 Weißabgleich	34
4.4 Gestalt des Nutzsignals	35
4.4.1 Intensität des reflektierten Lichtanteils	36
4.4.2 Polarisationsgrad des reflektierten Lichtanteils	38
4.4.3 Polarisationsgrad reflektierter und remittierter Lichtanteile	39

4.4.4	Polarisationsrichtungen	40
4.5	Untersuchungsziele der Diplomarbeit	41
5	Versuchsdurchführung	42
5.1	Aufbau	42
5.2	Testchart	44
5.3	Prüfkriterium	46
5.4	Workflow	46
5.4.1	Fuji FinePix S3 Pro	46
5.4.2	Aussteuerung	46
5.4.3	Polarisierung der Bilddaten	47
5.4.4	Aufbereitung der Rohbilder	48
5.5	Auswertungssoftware	50
5.5.1	GetImageInformation	51
5.5.2	AnalyseImageInformation	52
5.5.2.1	Operationen und Grafiken der Auswertung	54
6	Auswertung der Versuchsergebnisse	61
6.1	Aussagekraft der Messwerte	61
6.2	Genauigkeitsanforderungen an den Farbbort der Lichtfarbe	62
6.3	Einfluss des Einfallswinkels	63
6.4	Einfluss des Verschwenkwinkels	68
6.5	Einfluss verschiedener Polarisationswinkel	73
6.6	Eigenschaften verschiedener Oberflächen	77
6.6.1	Matte Oberflächen	77
6.6.2	Glatte Oberflächen	79
6.6.3	Verwinkelte Oberflächen	86
6.6.4	Beschichtete Oberflächen	89
6.7	Einfluss von Umgebungslicht	90
6.8	Eigenschaften des Verfahrens bei Außenaufnahmen	93
6.8.1	Direktes Sonnenlicht	93
6.8.2	Indirektes Sonnenlicht	96
6.9	Zusammenfassung der kritischen Fälle	97
6.9.1	Schwaches Nutzsignal	97
6.9.2	Gerichtete Reflexion	97
6.9.3	Mehrfachreflexion	98
6.9.4	Polarisierte Remission	98
6.9.5	Ungenauigkeiten der Belichtungssteuerung	98
7	Zusammenfassung und Ausblick	99
	Anhang	103
	Literaturverzeichnis	165
	Abbildungsverzeichnis	167
	Grafiken	169

1 Einleitung

Die spektralen Reflexionseigenschaften der Körperoberflächen einer abzubildenden Szene sind unabhängig von der Beleuchtung immer konstant. Dagegen ist die Lichtfarbe der Beleuchtung variabel. Der Sensor einer Digital Still Camera (DSC) ist aufgrund seiner festen spektralen Empfindlichkeit nicht dazu in der Lage, auf die Schwankungen der Umgebungsbeleuchtung zu reagieren. Dies führt zu Farbverschiebungen bei der Bildaufzeichnung, so dass insbesondere neutrale Objekte entsprechend farbstichig wiedergegeben werden. Zur Lösung dieser Problematik besitzen Digitalkameras neben einer manuellen Anpassung an die beleuchtende Lichtart auch eine Abgleichsautomatik. Für diesen automatischen Weißabgleich bestimmt eine kameraspezifische Verarbeitungssoftware die beleuchtende Lichtfarbe und balanciert die Verschiebung in den einzelnen Bildkanälen aus.

Bei herkömmlichen Verfahren zum automatischen Weißabgleich wird die beleuchtende Lichtfarbe geschätzt. Ein Algorithmus analysiert das digitale Bildsignal auf der Grundlage bestimmter Annahmekriterien. Ist ein Kriterium nicht erfüllt, scheitert das Verfahren. In der Praxis ist es unmöglich, Kriterien zu definieren, die alle Bildsituationen umfassen. Daher arbeitet der auf Schätzung basierende automatische Weißabgleich nicht zuverlässig.

Im Rahmen dieser Arbeit kommt ein neues Verfahren zum Einsatz, bei dem die beleuchtende Lichtfarbe messtechnisch ermittelt wird. Theoretisch beruht das Verfahren auf den spektralen Reflexionseigenschaften von Körperoberflächen. Demnach besitzt das an Körperoberflächen reflektierte Licht die Eigenschaft, polarisiert zu sein. Im Gegensatz dazu ist das remittierte Licht an Körperoberflächen unpolarisiert. Diesen Zusammenhang nutzt das neue Verfahren. Bei seiner Durchführung werden nur die durch Reflexion entstandenen Signalanteile detektiert und analysiert. Die Verhältnisse in den Farbkanälen des Signals geben Auskunft über die spektrale Zusammensetzung der beleuchtenden Lichtfarbe. Mit der ermittelten Information lassen sich zuverlässige Korrekturwerte für einen Weißabgleich ermitteln.

Der messtechnische Charakter des Verfahrens gewinnt theoretisch gegenüber herkömmlichen Verfahren. Da sich das Verfahren jedoch in einem frühen Entwicklungsstadium befindet, fehlen noch viele Erkenntnisse aus der praktischen

Anwendung. Ziel dieser Diplomarbeit ist es, durch Grundlagenuntersuchungen die Eigenschaften und insbesondere Schwachstellen dieses messtechnischen Ansatzes herauszuarbeiten, die bei einer späteren Optimierung berücksichtigt werden müssen. Die Arbeit beschäftigt sich daher nicht mit der praxistauglichen Umsetzung des Verfahrens.

Zu Beginn werden im zweiten Kapitel die Grundlagen dieser Arbeit erläutert. Das Verfahren nutzt die Eigenschaften von linear polarisiertem Licht. Daher wird der Unterschied von unpolarisiertem und polarisiertem Licht beschrieben. Es folgt die Erläuterung der Entstehung von linear polarisiertem Licht. Schwerpunkt der Betrachtung ist die Polarisation durch Reflexion. Deshalb werden unter dem Abschnitt Oberflächen und Beleuchtungsgeometrie die Vorgänge der Absorption, Remission und Reflexion erläutert. Hinzu kommen die Einführung einiger lichttechnischer Größen und die hier verwendete Definition des Polarisationsgrades. Durch die Messung des polarisierten Reflexionsanteils wird die Lichtfarbe ermittelt. Deshalb werden die spektralen Verteilungen der Beleuchtung näher erläutert.

Das Verfahren zur Ermittlung der beleuchtenden Lichtfarbe kann für die Durchführung eines automatischen Weißabgleichs angewendet werden. Im dritten Kapitel wird zunächst die Bildaufzeichnung des Auges und einer DSC erklärt. Mit dem Weißabgleich stellen sich beide Systeme auf die spektralen Eigenschaften einer Beleuchtung ein. Erklärt wird die Funktionsweise beider Systeme im Bezug auf den Weißabgleich.

Im vierten Kapitel wird das Prinzip des neuen Verfahrens dargestellt. Daneben wird auch seine Anwendung im Laborversuch erläutert. Zur Anwendung des Verfahrens werden die Bedingungen der polarisierten Bildaufzeichnung, die Differenzbildung zur Gewinnung der polarisierten Lichtinformation und die elektronische Weiterverarbeitung beschrieben. Dafür kommt ein Algorithmus zum Einsatz, dessen Verarbeitungsschritte erläutert werden. Ausführlich wird hier auf die Ermittlung der Lichtfarbe und den verwendeten Weißabgleich eingegangen. Ein Faktor der Funktionstauglichkeit des Verfahrens ist die Gestalt des Nutzsignals. Deshalb werden die Einflüsse, die auf das Nutzsignal wirken, geschildert. Zum Schluss dieses Kapitels folgt die Formulierung der Untersuchungsziele dieser Arbeit.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das neue Verfahren unter Laborbedingungen untersucht. Das fünfte Kapitel schließt sich mit der Beschreibung der Versuchsdurchführung an.

Beschrieben wird der Versuchsaufbau, das verwendete Testchart und der komplette Workflow. Für die Auswertung der Versuchsergebnisse wurde eine spezielle Software entwickelt, deren Verarbeitungsschritte näher erläutert werden. Die Software berechnet aussagekräftige Meßwerte und stellt sie grafisch dar.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Auswertung der Untersuchungsergebnisse. Die Auswertung wird in Kapitel sechs dokumentiert. Zu Beginn wird die Aussagekraft der Messungen bewertet und die Genauigkeitsanforderung an den Farbart der Lichtfarbe formuliert. Es folgt die Darstellung der Untersuchungsergebnisse. Betrachtet werden Einflüsse verschiedener Oberflächen- und Materialeigenschaften auf die Gestalt des Nutzsignals. Daraus resultiert auch die Lokalisierung kritischer Situationen. Außerdem wird die Praxistauglichkeit des Verfahrens mit der Untersuchung von Außenaufnahmen geprüft.

Das siebte Kapitel liefert die Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse, die Formulierung der Funktionskriterien des Verfahrens und gibt einen Ausblick auf weitere Entwicklungsmöglichkeiten.

2 Grundlagen

2.1 Polarisation

2.1.1 Licht

Licht ist ein Gemisch aus elektromagnetischen Transversalwellen. Diese Wellen bestehen aus einem elektrischen Feld \vec{E} und einem magnetischen Feld \vec{B} , deren Feldvektoren \vec{E} und \vec{B} senkrecht aufeinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung \vec{k} der Welle stehen. Es gilt die Beziehung:

$$\vec{E} \perp \vec{B} \perp \vec{k}.$$

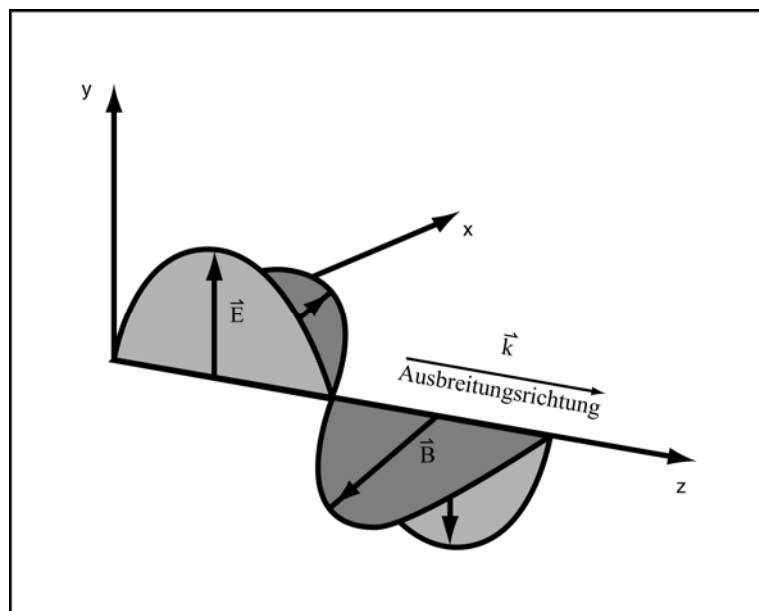


Abb. 1: Orientierungen einer transversalen elektromagnetischen Welle

Die Wirkung von \vec{B} gegenüber \vec{E} ist vernachlässigbar klein. Daher ist es üblich, eine Lichtwelle durch das zeitliche und räumliche Verhalten von \vec{E} zu beschreiben. [1]

$$\vec{E}(z, t) = \hat{E} \cdot e^{j(\omega t - kz)}$$

2.1.2 Unpolarisiertes Licht

In der Regel ist das in der Natur vorkommende Licht unpolarisiert. Dies bedeutet, dass bei der Ausbreitung der Welle keine Orientierung der Schwingungsebenen erkennbar ist.[2] Diese Erscheinung kommt durch das Überlagern verschiedener Wellen mit statistisch im Raum verteilten Polarisationsrichtungen zustande. Zum besseren Verständnis betrachtet

man dafür das Modell einer Lichtquelle. Das Modell besteht aus einer großen Anzahl von zufällig ausgerichteten atomaren Strahlern. Jeder emittiert bei Anregung eine Lichtwelle, deren Schwingungsrichtung sich aufgrund der unterschiedlichen Ausrichtungen fortlaufend ändern. Daraus ergibt sich, dass im zeitlichen Mittel jede Polarisationsrichtung gleich häufig vertreten ist und keine Orientierung erkennbar ist. Natürliches Licht lässt sich somit als unpolarisiert bezeichnen.

2.1.3 Linear polarisiertes Licht

Bei linear polarisiertem Licht schwingt der Feldvektor nur in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Jede beliebig linear polarisierte Welle kann in zwei orthogonale Teilwellen zerlegt werden, die in Phase schwingen:

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(kz - \omega t)$$

und

$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon).$$

Dieser Fall gilt für $\varepsilon = 0$ oder ein ganzzahliges Vielfaches von $\pm 2\pi$. Daraus resultiert die Summe der beiden orthogonalen Wellen [3].

$$E(z, t) = E_x(z, t) + E_y(z, t)$$

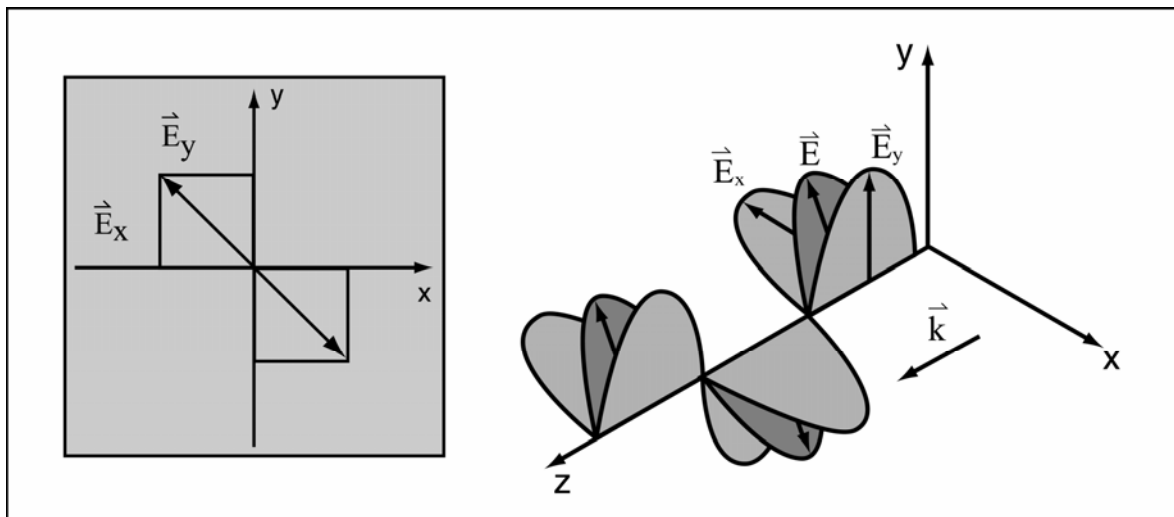


Abb. 2 Überlagerung zweier senkrecht zueinander schwingenden Felder E_x und E_y

2.1.4 Entstehung von linear polarisiertem Licht

In der Natur treten bestimmte Phänomene auf, die zur Entstehung von linear polarisiertem Licht führen. Darüber hinaus wird in diesem Abschnitt auch die technische Erzeugung dargestellt.

2.1.4.1 Polarisation durch Reflexion

Die Reflexion von Licht an der Grenzfläche zweier dielektrischer Medien ist eine der am häufigsten vorkommenden Quellen polarisierten Lichtes. Beim Auftreffen auf die Grenzfläche wird das Licht zum einen Teil reflektiert und zum anderen gebrochen transmittiert. Dabei sind der Reflexionsgrad ρ und der Transmissionsgrad τ abhängig vom Einfallswinkel α_1 und dem Brechungsindex n der Medien an den Grenzflächen.

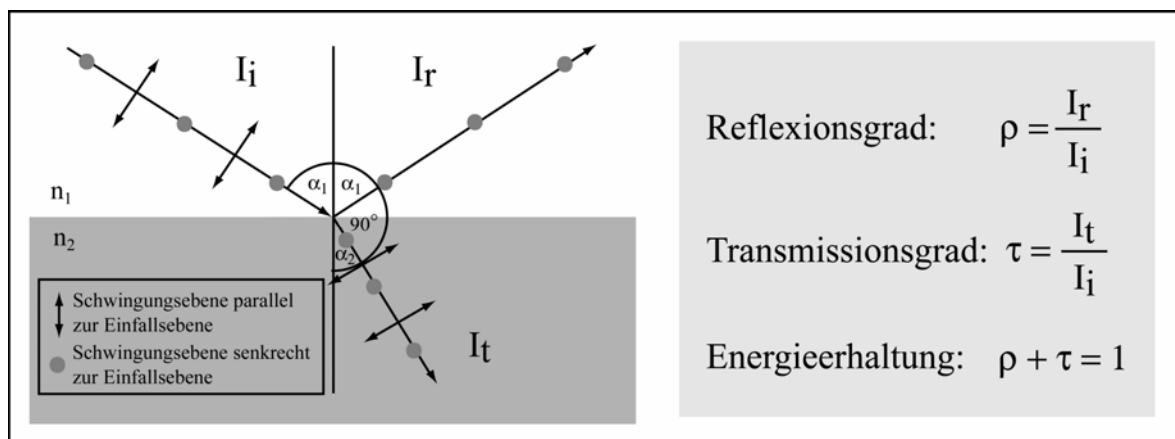


Abb. 3: Polarisation durch Reflexion

Die Betrachtung der beiden orthogonalen Anteile des Feldvektors verdeutlicht den Einfluss von Einfallswinkel α_1 auf den Reflexionsgrad ρ . Gemäß den Fresnel'schen Gleichungen für die Reflexion gilt für die zur Einfallsebene parallele Komponente :

$$\rho_p = \frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{\tan^2(\alpha + \beta)},$$

und für die senkrechte Komponente:

$$\rho_s = \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)}.$$

Senkrechte und parallele Komponente verhalten sich wie in Abb. 4 dargestellt. Es gibt einen Winkel α_p bei dem die parallele Komponente vollständig verschwindet. In diesem Fall liegt die Schwingungsebene des reflektierten Strahls senkrecht zur Einfallsebene, und das reflektierte Licht ist maximal polarisiert.

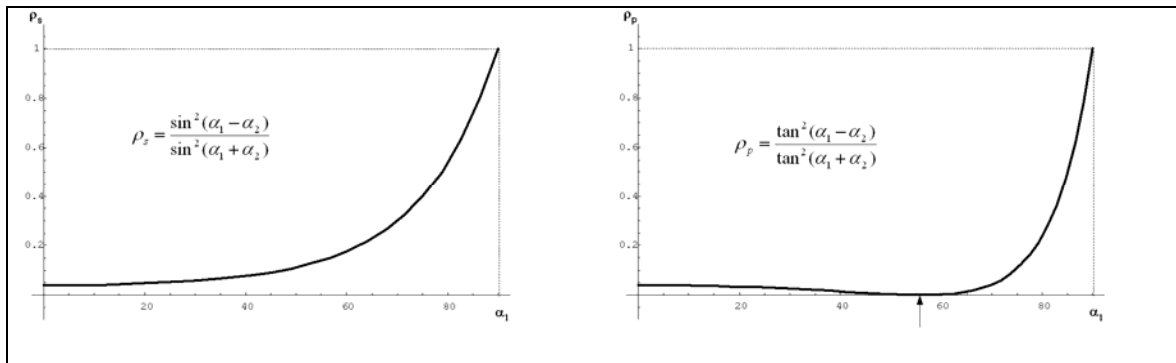


Abb. 4: Reflexionsgrade r_s für die senkrechte und r_p für die parallele Polarisationsrichtung

Der Winkel α_p der für die maximale Polarisation erforderlich ist wird nach seinem Entdecker Brewsterwinkel genannt. Er ist abhängig von der Brechzahl der reflektierenden Grenzfläche. Reflektierter und transmittierter Strahl stehen in diesem Fall senkrecht zueinander. Daraus folgt, dass

$$\alpha_p + \alpha_2 = 90^\circ \text{ und } \sin \alpha_2 = \cos \alpha_p ,$$

und aus dem Brechungsgesetz

$$\sin \alpha_p = n \sin \alpha_2$$

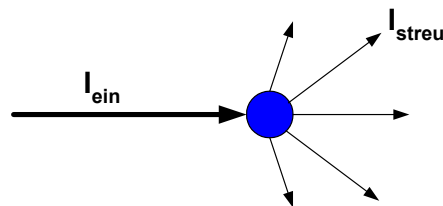
folgt

$$\tan \alpha_p = n .$$

Der Brewsterwinkel ist also derjenige Einfallswinkel, dessen Tangens gleich der Brechzahl des reflektierenden Stoffes ist. [4]

2.1.4.2 Polarisation durch Streuung

Eine weitere natürliche Quelle für die Entstehung von polarisiertem Licht ist die Streuung.



Polarisation durch Streuung (sog. Rayleigh-Streuung) tritt auf, wenn Licht auf Teilchen trifft, die kleiner als seine Wellenlänge sind. Das elektrische Feld des unpolarisierten Lichtes regt mit seinen x- und y-Komponenten die Teilchen zu Schwingungen in x- und y-Richtung an. Diese Dipolstrahlung bewirkt linear polarisiertes Licht senkrecht zu den x- und y-Achsen. [6]

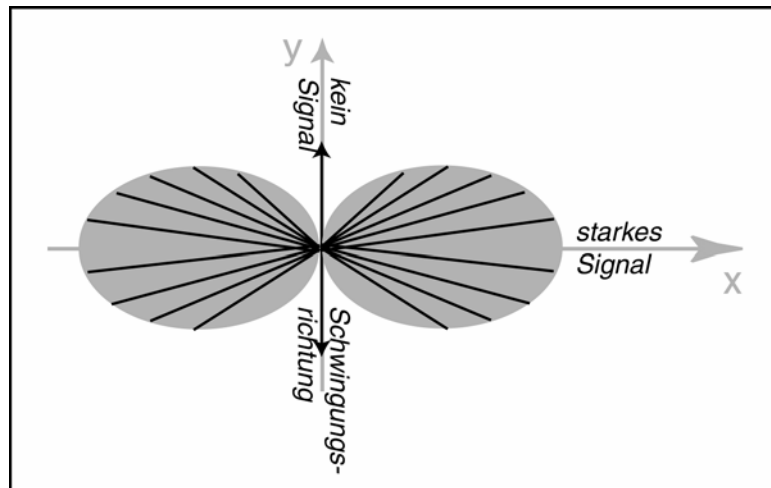


Abb. 5: Schwingung in y-Richtung bewirkt Abstrahlung in x-Richtung

Der Effekt erscheint beispielsweise beim Eintritt des Lichts in die Atmosphäre. Hierbei trifft das Licht auf die Atome der Luft. Sichtbar wird dieser Effekt beim Himmelsblau. Die kurzwelligen blauen Lichtanteile werden an den statistisch angeordneten Luftmolekülen häufiger abgelenkt als langwelligere Lichtanteile. Demnach ist das blaue Himmelslicht teilweise linear polarisiert.

2.1.4.3 Polarisation durch Absorption

Einige Materialien besitzen die Eigenschaft, Licht selektiv zu absorbieren. Die Selektion ist abhängig von der Polarisationsrichtung des Lichtes und der molekularen Ausrichtung des Materials.

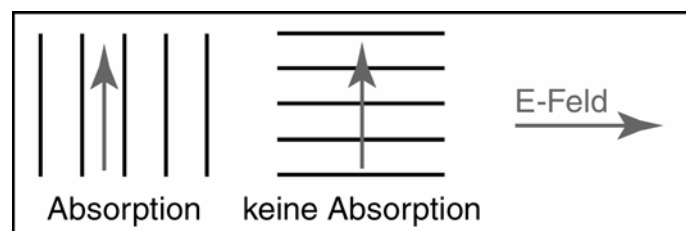
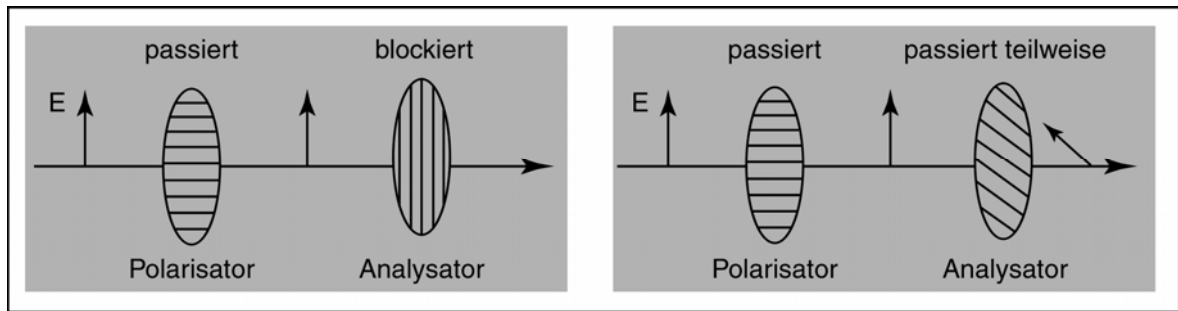


Abb. 6: Polarisation durch Absorption

Dichroitische Kristalle (z. B. Turmalin oder Herapathit) lassen entlang bestimmter Kristallrichtungen nur Licht einer bestimmten Polarisation durch.[6] Anders polarisiertes Licht wird absorbiert. Künstlich hergestellte Polarisationsfolien bestehen aus langkettigen ausgerichteten Kohlenwasserstoffmolekülen. Sie absorbieren das parallel zur Kette polarisierte Licht und lassen das senkrecht polarisierte passieren. Man kann die Folie so drehen, dass Licht der gewünschten Polarisation durchgelassen und solches der dazu senkrechten Polarisation absorbiert wird.[7]

**Abb. 7: Polarisationsfolie**

Die Richtung des elektrischen Feldvektors, für die das Licht durchgelassen wird, bezeichnet die Transmissionsachse des Filters. Vorrichtungen die eine Polarisation verursachen, werden als Polarisatoren bezeichnet. Der Nachweis von Polarisation wird mit einem Analysator durchgeführt. [8]

2.2 Oberflächen und Beleuchtungsgeometrie

2.2.1 Lichttechnische Größen

Die folgenden Betrachtungen werden durch die Darstellung einiger lichttechnischer Größen unterstützt. Unter der Lichtstärke I versteht man das Verhältnis von Lichtstrom Φ zum Raumwinkel Ω :

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

Eine punktförmige, nach allen Seiten gleichmäßig strahlende Lichtquelle der Lichtstärke I würde den Lichtstrom $\Phi = 4\pi I$ liefern. Lichtquellen sind jedoch meist nicht punktförmig. Ihre Ausstrahlung ist vom Winkel zwischen der Flächennormale einer Fläche dA_S und der Beobachtungsrichtung r abhängig. Daher führt man den Begriff der Leuchtdichte ein:

$$L = \frac{d^2\Phi}{\cos\varphi_S dA_S d\Omega}$$

Zusammen mit der Definition des Raumwinkels

$$d\Omega = \frac{\cos\varphi dA}{r^2},$$

wird daraus das Photometrische Grundgesetz formuliert:

$$L = \frac{r^2 d^2\Phi}{\cos\varphi_S dA_S \cos\varphi_E dA_E}.$$

Beleuchtet man eine Empfängerfläche dA_E mit dem Lichtstrom $d\Phi$, herrscht auf der Fläche die Beleuchtungsstärke

$$E = \frac{d\Phi}{dA_E}.$$

Von der Lichtquelle dA_S aus wird die im Abstand r und mit Winkel φ_E befindliche Fläche dA_E unter dem Raumwinkel $d\Omega$ gesehen:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos\varphi_E \Omega_0,$$

bzw. bei senkrechtem Einfallswinkel [9]:

$$E = \frac{I}{r^2} \Omega_0.$$

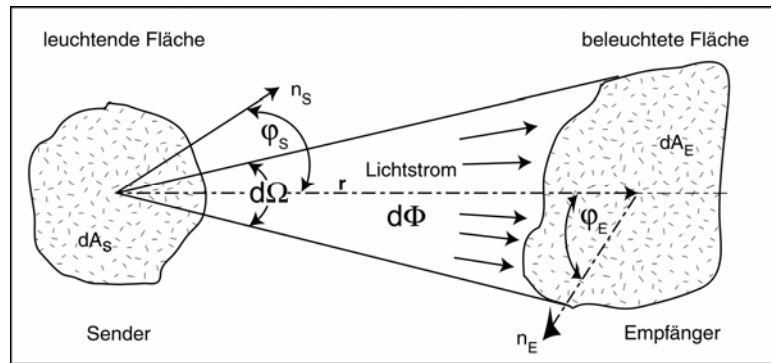


Abb. 8: Darstellung zum Photometrischen Grundgesetz

2.2.2 Absorption und Remission

Trifft ein Strahl auf eine Oberfläche, dringt er zum Teil in das Medium ein. Dabei wird das Licht im Körperinnern teilweise absorbiert, indem die Lichtenergie in eine andere Energieform umgewandelt wird. Gewandelt wird entweder in kinetische Energie oder in Strahlungsenergie. Wahrnehmbar ist dieser Effekt beispielsweise in Form von Wärme oder Fluoreszenz. Dabei ist der Absorptionsgrad α abhängig von der Wellenlänge λ und der Materialbeschaffenheit des Mediums.[10] Er beschreibt das Verhältnis der absorbierten Strahlung I_a zur auffallenden Strahlung I_0

$$\alpha(\lambda) = \frac{I_0 - I_a}{I_0}$$

Die Wellenlängenabhängigkeit bedingt die Farbigkeit des Körpers. Durch mehrfache Streuungen und Reflexionen erfährt der Strahl im Innern zahlreiche Ablenkungen und wird deshalb diffus remittiert. Das remittierte Licht ist unpolarisiert und bestimmt durch die vorangegangene Absorption die Farbigkeit des Körpers.

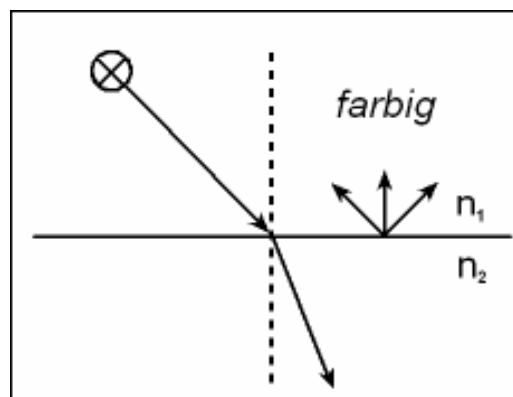


Abb. 9: Absorption und Remission

2.2.3 Reflexion

Das zweite Reflexionsgesetz besagt, dass bei der Reflexion eines einfallenden Strahls der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist. Und der einfallende Strahl definiert mit dem ausfallenden Strahl die Einfallsebene, die senkrecht auf der reflektierenden Fläche steht.

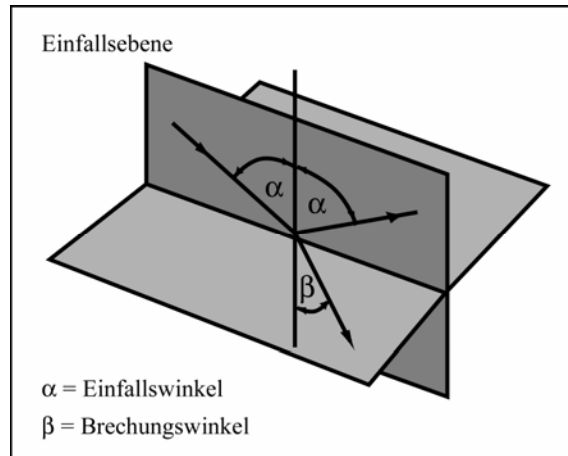


Abb. 10: Einfallsebene

Dabei sind die Richtung der reflektierten Strahlung und der Reflexionsgrad abhängig von der Struktur der reflektierenden Oberfläche. [11]

2.2.3.1 Gerichtete Reflexion

Die Unebenheiten bei einer glatten (spiegelnden) Oberfläche sind klein im Verhältnis zu einer Wellenlänge. An diesen Oberflächen werden Lichtstrahlen gerichtet reflektiert.

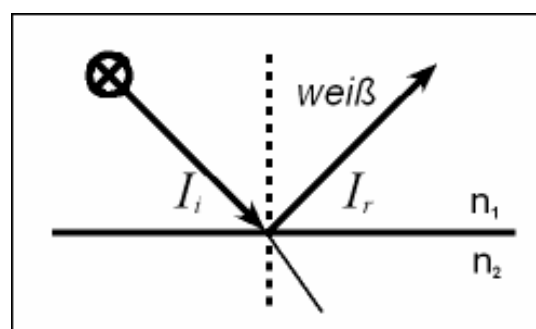


Abb. 11: Gerichtete Reflexion

Dies geschieht nahezu wellenlängenunabhängig. Mit der gerichteten Reflexion wird die stärkste Helligkeit von Reflexen im Bild erreicht, wobei die Helligkeit des Reflexes durch den Reflexionsgrad der Oberfläche beeinflusst wird:

$$L = \rho_{ger} \cdot L_S$$

mit

$$\rho_{ger} = \frac{I_r}{I_i} \approx \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2.$$

Das Reflexbild zeigt die Farbe des beleuchtenden Körpers, solange sich der Reflexionsgrad unabhängig von der Wellenlänge verhält. Das ist zumindest für dielektrische Grenzflächen hinreichend gut erfüllt. Außerdem besitzt das an der Grenzfläche reflektierte Licht die Eigenschaft, zumindest teilweise linear polarisiert zu sein. [12]

Bei einer Reflexion von 100% wird die Oberfläche als idealer Spiegel bezeichnet. Die Helligkeit des Reflexes ist in diesem Falle maximal.

2.2.3.2 Diffuse Reflexion

Ist die Struktur einer Oberfläche rau, wird die einfallende Strahlung gestreut reflektiert. Die Richtung, in die reflektiert wird, wird von der Ausrichtung der Rauigkeit einer Oberfläche beeinflusst. Diese Streuung wird als diffuse Reflexion bezeichnet. Sie geschieht wie bei der gerichteten Reflexion an dielektrischen Grenzflächen nahezu wellenlängenunabhängig.

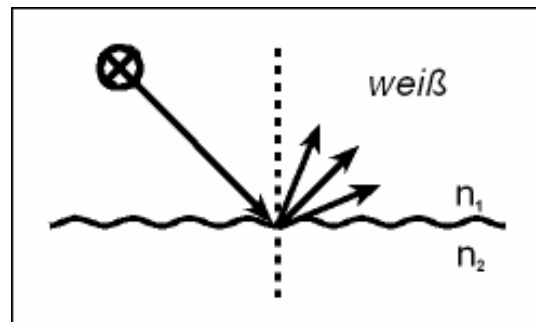


Abb. 12: Diffuse Reflexion

Solche matten Flächen erscheinen im idealen Fall aus allen Richtungen betrachtet gleich hell, da sie das Licht mit gleicher Intensität in alle Richtungen gleichförmig reflektieren. Für den Reflexionsgrad ρ_{diff} gilt dann:

$$\rho_{diff} = \frac{\rho_{ger}}{\pi} \text{ (ideal diffus).}$$

Mit der Leuchtdichte L wird der Helligkeitseindruck der reflektierten Strahlung beschrieben

$$L = \rho_{diff} \cdot E \cdot \Omega_0^{-1}$$

mit einer Beleuchtungsstärke

$$\begin{aligned} E &= \frac{I}{d^2} \cdot \cos(\alpha) \cdot \Omega_0 \quad (\text{für Punkttstrahler}) \\ &= \frac{L_s \cdot A_s}{d^2} \cdot \cos(\alpha) \cdot \Omega_0 \quad (\text{für Flächenstrahler}) \end{aligned}$$

Insgesamt ergibt sich also eine Flächenhelligkeit ideal diffus reflektierender Oberflächen von

$$L = \frac{\rho_{ger}}{\pi} \cdot \frac{L_s \cdot A_s}{d^2} \cdot \cos(\alpha) = \rho_{ger} \cdot L_s \cdot \frac{A_s}{\pi \cdot d^2} \cdot \cos(\alpha).$$

Die Helligkeit des Reflexes ist abhängig vom Abstand d der Lichtquelle zum Objekt und vom Einfallswinkel α . Auch bei der diffusen Reflexion ist der reflektierte Anteil des Lichtes teilweise linear polarisiert. [13]

Im Vergleich mit dem Fall der gerichteten Reflexion wird deutlich, dass die Flächenhelligkeit der Reflexe bei diffusen Oberflächen aufgrund des Faktors $\frac{A_s}{\pi \cdot d^2} \cdot \cos(\alpha)$ immer erheblich geringer sein muß als bei glatten Oberflächen.

2.2.3.3 Polarisationsgrad

Als Maß für die lineare Polarisation P reflektierter Lichtanteile wird der sog. Polarisationsgrad als

$$P = \frac{I_s - I_p}{I_s + I_p} = \frac{\rho_s - \rho_p}{\rho_s + \rho_p}$$

definiert¹. Die Indizes bezeichnen dabei die senkrecht (s) und parallel (p) zur Einfallsebene auftretenden Strahlanteile. Beim Brewsterwinkel ergibt sich damit ein Polarisationsgrad $P=1$.

¹ Modifikation der eigentlichen Definition nach Naumann [14]

2.3 Spektrale Verteilung der Beleuchtung

2.3.1 Spektrum elektromagnetischer Strahlung

Das Spektrum elektromagnetischer Wellen wird in verschiedene Wellenarten unterteilt. Die Arten unterscheiden sich physikalisch hinsichtlich der Wellenlänge λ . Die Abb. verdeutlicht, welche Wellenlängenbereiche zu welcher Strahlungsart gehören. Das für den Menschen sichtbare Spektrum liegt im Bereich von ca. 380-780nm. [15]

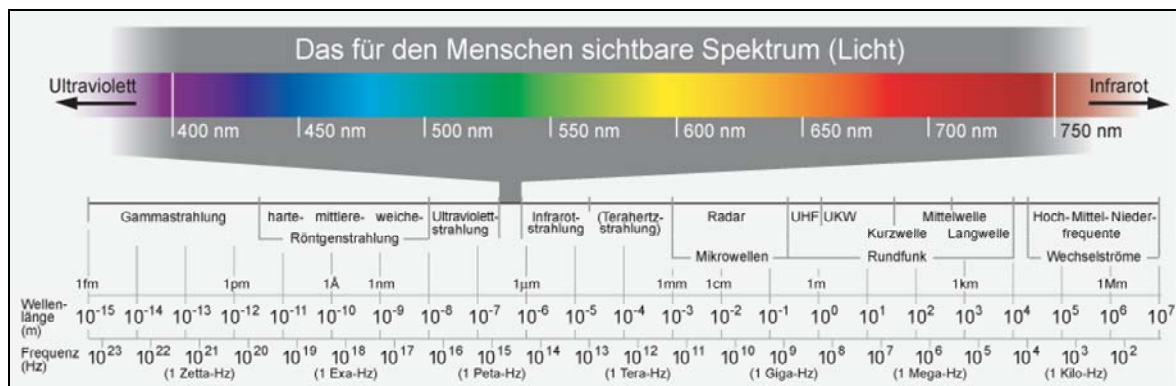


Abb. 13: Spektrum der elektromagnetischen Strahlung

2.3.2 Spektrale Strahlungsverteilung von Lichtquellen

Lichtquellen lassen sich anhand ihrer spektralen Strahlungsverteilung deutlich voneinander unterscheiden. Dabei trennt man in verschiedene Spektrentypen. Glühende Körper wie Sonne, Kerze oder Glühlampe werden als Temperaturstrahler bezeichnet. Sie emittieren kontinuierliche Spektren, d.h. im Licht ist jede sichtbare Wellenlänge enthalten. Dagegen erzeugen Gasentladungslampen oder Leuchtstoffröhren Linienspektren, die nur bei bestimmten diskreten Wellenlängen Intensitätswerte aufweisen. [16]

2.3.3 Farbtemperatur

Mit der spektralen Zusammensetzung wird die Farbe einer Lichtquelle exakt beschrieben. Die Ermittlung ist in der Praxis jedoch sehr aufwendig. Deshalb wurde die Farbtemperatur in Anlehnung an die Temperaturstrahler als Maßzahl zur Beurteilung von Farbe eingeführt. Die farbliche Charakterisierung der Lichtquelle wird durch den Vergleich mit dem Plank'schen Strahler definiert und im Plank'schen Kurvenzug dargestellt.

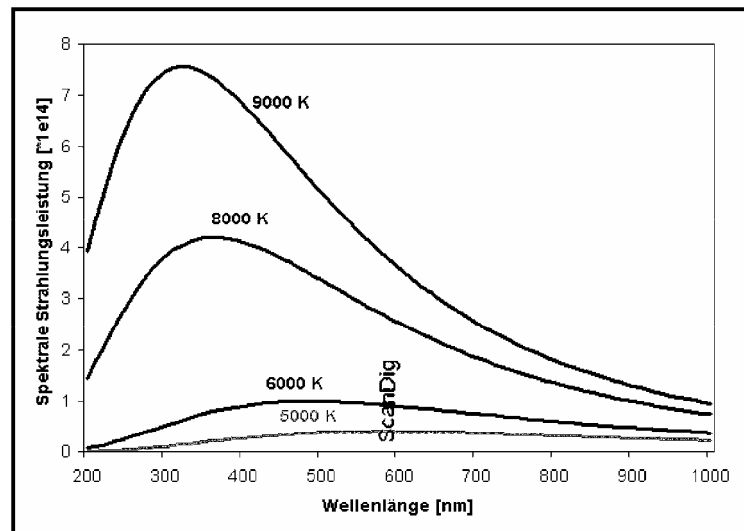
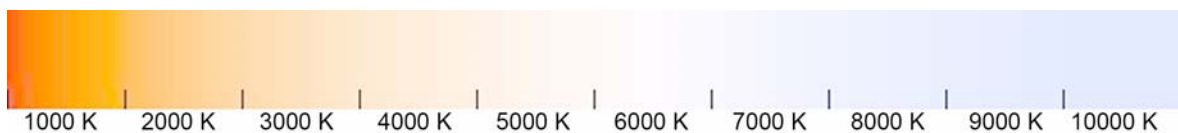


Abb. 14: Frequenzspektrum des Schwarzen Strahlers

Dieser Strahler ist ein absolut schwarzer Körper mit hundertprozentigem Absorptionsvermögen, der bei Erhitzung Licht ausstrahlt. Erhöht sich die Temperatur des Schwarzen Strahlers, so vergrößert sich im Spektrum der Blauanteil und der Rotanteil wird geringer. In Abhängigkeit von der Temperatur hat das Licht eine bestimmte spektrale Zusammensetzung. Man spricht deshalb auch von der Farb- oder auch Verteilungstemperatur des Lichtes. [17]



Die Farbtemperatur wird in der Einheit Kelvin (K) angegeben. Die Bestimmung der Farbtemperatur erfolgt durch den Vergleich des Schwarzen Strahlers mit einer Lichtquelle. In der folgenden Tabelle sind Richtwerte für typische Lichtquellen.

Lichtquelle	Farbtemperatur (K)
Kerze	1500
Glühlampe (100W)	2800
Halogenlampe	3000
Leuchtstoffröhre	4000
Morgensonne/Abendsonne	5000
Vormittags-/Nachmittagssonne	5500

Tageslichtlampe	5600-7000
Bedeckter Himmel	6500-7500
Nebel	7500-8500
Blauer Himmel	9000-12000

Strahlungsquellen, die nicht auf dem Prinzip der Temperaturstrahlung beruhen, weichen oft erheblich von der spektralen Verteilung des Planck'schen Strahlers ab und werden von verschiedenen Empfängern (z.B. Digitalkamera und Auge) sehr unterschiedlich wahrgenommen (Empfängermetamerie). Die Lichtfarbe einer Leuchtstofflampe mit ihren Linienspektralanteilen lässt sich daher in Ihrer Wahrnehmung nur unzureichend durch eine Angabe der ähnlichsten Farbtemperatur beschreiben.

3 Bildaufzeichnung

Das menschliche Auge ist in Verbindung mit dem Verarbeitungsprozess des Gehirns das bekannteste Bildaufzeichnungssystem. Viele technische Systeme orientieren sich am Aufbau und der Funktionsweise des Auges.

Die spektralen Eigenschaften einer Digital Still Camera (DSC) werden für eine exakte Nachbildung der Empfindlichkeit des Auges nachempfunden.

Die Farbwahrnehmung beider Systeme wird stark beeinflusst von der Lichtfarbe einer beleuchteten Szene. Sowohl beim Auge als auch bei der DSC wird eine Anpassung an unterschiedliche Beleuchtungssituationen durchgeführt.

3.1 Bildaufzeichnung durch das Auge

Eine Lichtquelle mit dem Spektrum $I(\lambda)$ beleuchtet ein Objekt mit dem Remissionsspektrum $\rho(\lambda)$. Wird dieses Objekt vom Auge abgebildet, fällt das reflektierte Licht durch die Linse des Auges mit der Transmission $\tau(\lambda)$. Danach trifft das Licht auf die Lichtrezeptoren der Netzhaut, die in Abhängigkeit der Reizung Signale ($s_R(\lambda)$, $s_G(\lambda)$, $s_B(\lambda)$) abgeben. Diese Impulse werden ans Gehirn weitergeleitet und dort zum eigentlichen Farbeindruck weiterverarbeitet.

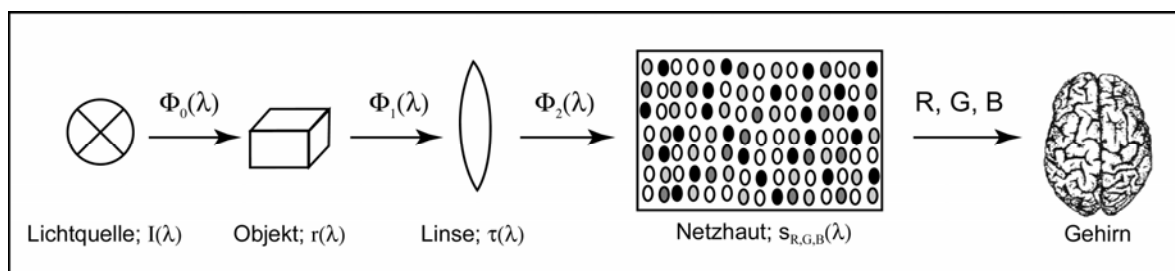


Abb. 15: Bildaufzeichnung des Auges

$$R / G / B_{\text{Auge}} = \int_{380nm}^{780nm} \Phi_0(\lambda) \cdot r(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot s_{R/G/B}(\lambda) d\lambda$$

3.1.1 Spektrale Empfindlichkeit des Auges

In der Netzhaut des Auges liegen die Lichtrezeptoren, die sich in zwei verschiedenen Arten unterscheiden. Diese Zellen werden Stäbchen und Zapfen genannt. Die Stäbchen haben alle das gleiche Empfindlichkeitsspektrum mit einem Absorptionsmaximum bei etwa

508nm. Die Farbwahrnehmung wird durch drei verschiedene spektrale Empfindlichkeiten bei den Zapfenarten ermöglicht. Ihre Bezeichnung nach L-, M- und S- (oder K-) Zapfen steht für lang-, mittel- oder kurzwellenlängenempfindliche Zapfen. Die Absorptionsmaxima liegen für L-Zapfen in der Spektralregion Rot bei etwa 564 nm, für M-Zapfen in der Spektralregion Grün bei etwa 534 nm und für S-Zapfen in der Spektralregion Blau bei etwa 419 nm.[18] Die gesamten Absorptionsbereiche der Sehzellen sind aus den Kurven der Abb. 16 zu entnehmen. Für den Menschen ist aus der Bandbreite elektromagnetischer Wellen der Bereich von ca. 400-700 nm sichtbar.

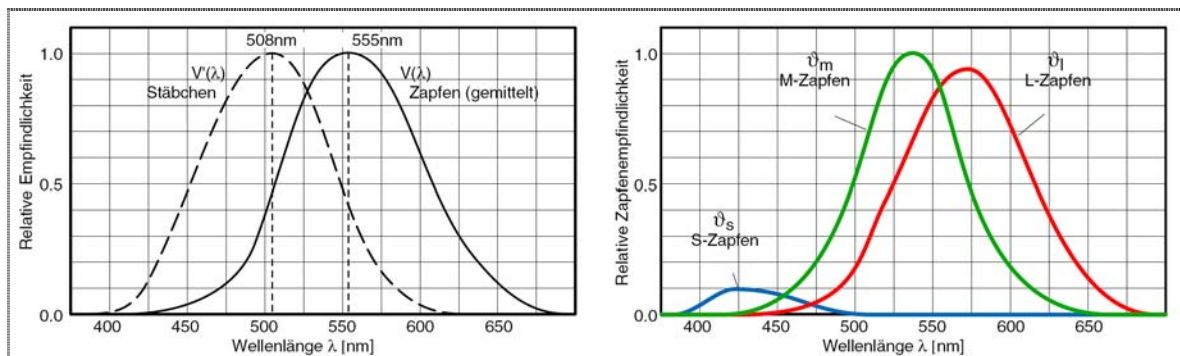


Abb. 16: Spektrale Empfindlichkeit von Stäbchen und Zapfen beim Menschen

3.1.2 Dreifarbentheorie

Aus dem farbigen Licht dreier Primärfarben können beliebige Farben gemischt werden. Diese Eigenschaft lässt sich auf die Funktion der Farbrezeptoren des Auges übertragen. Die drei Farbrezeptoren reagieren verschieden sensibel auf die Wellenlängen des sichtbaren Lichtes. Ein Lichtreiz regt die Rezeptoren in entsprechender Intensität an. Die Wahrnehmung der Farbe steht im direkten Verhältnis zur Reizstärke der verschiedenen Rezeptortypen. Ein weißer Sinneseindruck entsteht, wenn die drei Typen in gleicher Stärke angeregt werden. Beim Sinneseindruck schwarz hat keine Reizung stattgefunden. [19]

3.1.3 Farbverarbeitung im Auge

Die Lichtrezeptoren wandeln optische Reize in Nervensignale um. Diese Impulse werden an die Ganglienzellen der Netzhaut weitergeleitet. Die Nervenzellen der Ganglienzellen bilden den Sehnerv. Er stellt die direkte Verbindung zum Gehirn her. Hier findet eine Punkt-für-Punkt Abbildung der von der Netzhaut weitergeleiteten Signale statt. [20]

3.2 Bildaufzeichnung einer DSC

Bei der Bildaufzeichnung einer DSC wird wie beim Auge die Überlagerung des Spektrums $I(\lambda)$ einer Lichtquelle mit dem Remissionsspektrum $\rho(\lambda)$ eines beleuchteten Objektes abgebildet. Die Abbildung erfolgt durch ein Linsensystem mit einer Transmission von $\tau(\lambda)$. Im Strahlengang der Kamera trifft das Licht auf einen Infrarotfilter mit einer Transmission von $\tau_{IR}(\lambda)$. Vor dem Sensor befindet sich außerdem eine Farbfiltermaske ($\tau_R(\lambda)$, $\tau_G(\lambda)$, $\tau_B(\lambda)$). Dadurch wird das Licht in drei spektrale Bereiche für z.B. Rot, Grün und Blau zerlegt. So kann der helligkeitsempfindliche Bildsensor im Anschluss eine Farbinformation verarbeiten. Der Sensor erfasst die gefilterte auftreffende Strahlungsleistung punktweise und wichtet die spektrale Verteilung mit seiner relativen spektralen Empfindlichkeit $s(\lambda)$.

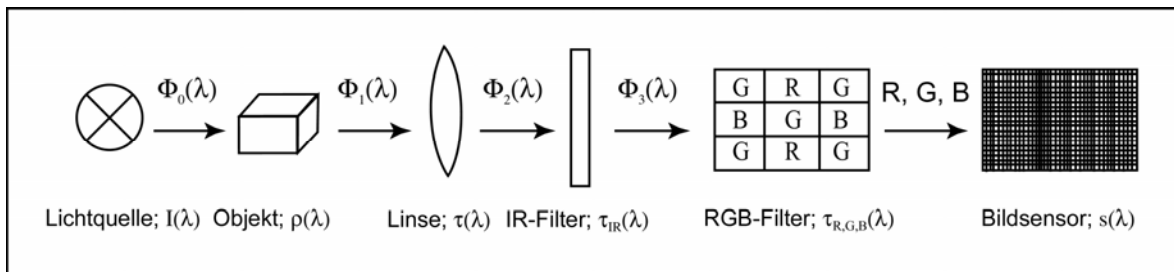


Abb. 17: Bildaufzeichnung einer Digitalkamera

Insgesamt ergibt sich daraus die Sensorantwort:

$$R / G / B_{\text{sensor}} = \int_{380nm}^{780nm} \Phi_0(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \tau_{IR}(\lambda) \cdot \tau_{R/G/B}(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda$$

3.2.1 Spektrale Empfindlichkeit eines Bildsensors

Der spektrale Strahlungsfluß $\Phi(\lambda)$ fällt auf einen Empfänger mit der spektralen Empfindlichkeit $s(\lambda)$ und erzeugt dort den Photostrom i [21]:

$$i = \int_0^{\infty} \Phi(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda$$

Bildsensoren sind im roten und infraroten Wellenlängenbereich empfindlicher als das Auge. Deshalb werden zusätzlich meist Infrarotfilter verwendet. Diese Filter kompensieren die Infrarotempfindlichkeit, um die Sensorantwort an die menschliche Wahrnehmung anzupassen.

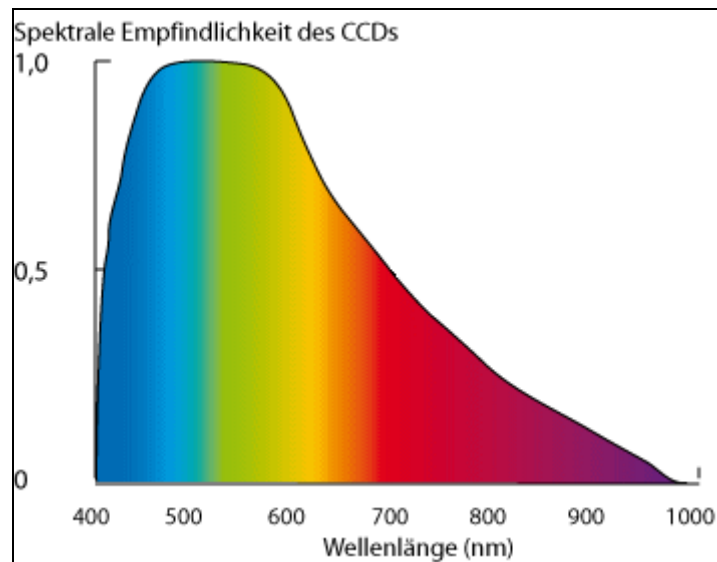


Abb. 18: Spektrale Empfindlichkeit eines CCD-Sensors

Da der Sensor einer DSC nur helligkeitsempfindlich ist, wird zur Verarbeitung von Farbinformation ein optisches System notwendig, das Licht in drei spektrale Bereiche zerlegt. In der Praxis kommt häufig die 1-Chip-Kamera mit Bayer-Matrix zum Einsatz. Bei dieser über dem Chip angebrachten Maske wechseln sich zeilenweise die Filterkombinationen Rot-Grün und Blau-Grün ab. So erfassen die Zellen des Sensors Helligkeitswerte für die Rot-, Grün- und Blauanteile des entsprechenden Bildpunktes. Pro Zelle wird nur ein Helligkeitswert ermittelt. Da für die farbige Darstellung eines Pixels aber alle drei Werte benötigt werden, werden die zwei fehlenden Werte aus der Nachbarschaft interpoliert. Zur Interpolation kommen je nach Hersteller verschiedene Algorithmen zum Einsatz. Der Vorgang wird Demosaicking genannt. [22]

3.3 Weißabgleich

Die Absorptionseigenschaften von Objekten sind immer gleich. Dagegen ändert sich die spektrale Zusammensetzung der Beleuchtung häufig. Beispielsweise verändert sich durch den Sonnenstand im Tagesverlauf die spektrale Zusammensetzung des natürlichen Lichtes. Der Farbreiz ist ein Produkt aus der Beleuchtung und den Absorptionseigenschaften. Dadurch ändert sich auch die Farbe des Lichtes, die von einem Gegenstand abgestrahlt wird. Dies führt zu einer Verschiebung der neutralen Bildinhalte in Richtung beleuchtender Lichtfarbe. Der Weißabgleich balanciert diese Verschiebung aus, so dass neutrale Bildinhalte einer Szene nach der Aufzeichnung wieder neutral erscheinen.

3.3.1 Chromatische Adaptation

Das menschliche Auge ist dazu in der Lage, sich an die spektrale Zusammensetzung unterschiedlicher Beleuchtungssituationen anzupassen. Diese Anpassung erfolgt bei lang andauernden Reizen und kann bis zum Wegfall der Wahrnehmung führen. Wenn die farbempfindlichen Rezeptoren in der Netzhaut längere Zeit dieselbe Farbe wahrnehmen, dann werden sie unempfindlicher und passen sich der Dauerbelastung an. Die entsprechende Farbe wird dann weniger stark wahrgenommen.

Erreicht wird diese Anpassung durch die Veränderung der Empfindlichkeit in den Zapfen. Eine weitere Ursache kann auch die Modifizierung der Reaktion des verarbeitenden Nervensystems sein. Den Vorgang der chromatischen Adaptation kann man auch als Weißabgleich des Auges bezeichnen.[23]

3.3.2 Weißabgleich einer DSC

Beim Weißabgleich einer DSC wird durch Korrektur des Unbuntpunktes eine Anpassung an die Aufnahmebeleuchtung erreicht. Das Verfahren wird in 2 Schritten durchgeführt:

1. Bestimmung des Weißpunkts
2. Normierung der linearen Farbkanäle auf die Weißfarbwertanteile

Der Weißpunkt entspricht den Farbwerten der beleuchtenden Lichtfarbe, wie sie der Sensor aufgrund seiner spektralen Empfindlichkeiten empfängt. Bisherige automatische Verfahren benutzen zahlreiche Algorithmen, die mit Hilfe von theoretischen Ansätzen diese Lichtfarbe schätzen. Mit den Farbwerten der Lichtfarbe werden dann anschließend die einzelnen Farbkanäle ausbalanciert. Ziel ist es, gleiche R-,G- und B-Werte für die neutralen Stellen in der Szene zu erhalten.

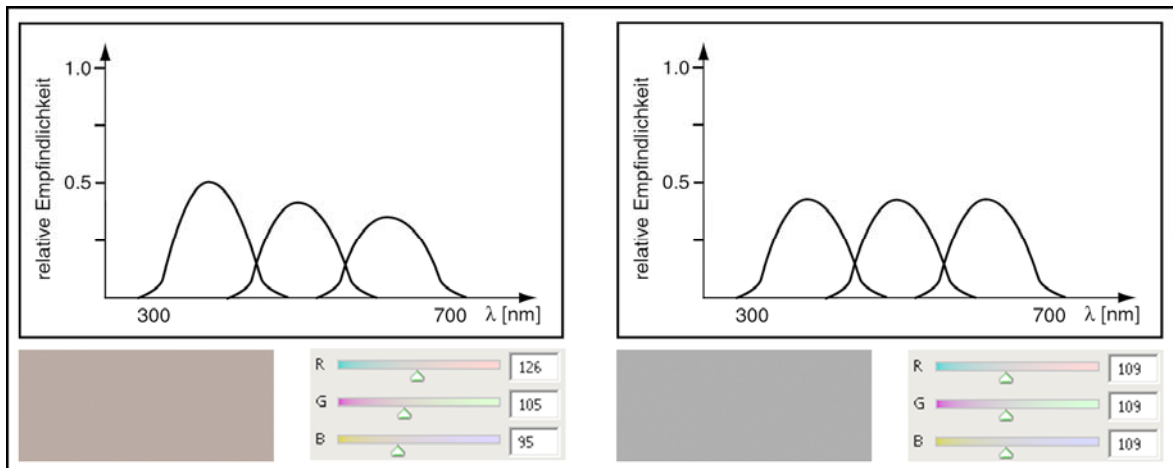


Abb. 19: Balancieren der R-,G- und B-Kanäle eines neutralen Bildpunktes

Das digitale Bild besteht aus Intensitätswerten (R, G, B), die durch das Spektrum der Beleuchtung $\Phi(\lambda)$, die Oberflächenreflexion $\rho(\lambda)$ und die spektrale Empfindlichkeit des Sensors $s(\lambda) = (r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda))$ definiert werden:

$$(R, G, B) = \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \rho(\lambda) s(\lambda) d\lambda$$

Der Weißpunkt entsteht durch die Aufnahme einer ideal weißen Fläche mit $\rho(\lambda)=1$ und entspricht damit der beleuchtenden Lichtfarbe:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}_W = \int_{\lambda} \Phi(\lambda) s(\lambda) d\lambda$$

Der eigentliche Weißabgleich normiert die Bilddaten auf die Farbwerte des Weißpunkts:

$$R_{WB} = \frac{R}{R_W}$$

$$G_{WB} = \frac{G}{G_W}$$

$$B_{WB} = \frac{B}{B_W}$$

Bei den bisherigen Algorithmen zur Bestimmung des Weißpunkts handelt es sich ausnahmslos um Schätzverfahren, die wahrscheinliche Farbwerte der Lichtfarbe aus den Bilddaten berechnen. Diese Verfahren basieren auf unterschiedlichen Ansätzen. Teilweise sind sie sehr komplex und in ihrer Anwendung zuverlässig. Da es sich bei allen aber um Schätzungen handelt, treten insbesondere bei Kunstlicht, Leuchtstoffbeleuchtung und in Mischlichtsituationen Ungenauigkeiten auf. Im Folgenden werden zwei häufig zum Einsatz kommende Ansätze dargestellt. Die Beschreibung ihrer Schwächen weist auf den Nachteil der Schätzung hin.

3.3.2.1 Gray World Algorithm

Der von G. Buchsbaum entwickelte Algorithmus basiert auf der Annahme, dass die Oberflächenreflexionen einer Szene gemittelt grau ergeben. Übertragen auf digitale Bilder sollten die Intensitätswerte jedes Kanals im Mittel auch grau sein.

$$\frac{\int s(\lambda, x) dx}{\int dx} = k$$

Jede Abweichung von dieser Annahme lässt auf die Lichtfarbe der Szenenbeleuchtung schließen. Mit dieser Methode kann also die Lichtfarbe der Beleuchtung geschätzt werden. Durch Mittelung der R-, G- und B-Kanäle eines Bildes wird ein mittlerer Grauwert für das gesamte Bild ermittelt. Jede Farbkomponente wird entsprechend dieser Abweichung an den mittleren Grauwert angepasst. Der dazu benötigte Skalierungsfaktor ergibt sich durch Division des mittleren Grauwertes eines Bildes mit dem Mittelwert des jeweiligen Farbkanals. Der Algorithmus liefert Ergebnisse mit hoher Genauigkeit, wenn viele reflektierende Oberflächen in der Szene vorhanden sind. Ist dies nicht der Fall arbeitet der Algorithmus ungenau. [24]

3.3.2.2 White Patch Algorithm

Dieser Algorithmus geht von der Annahme aus, dass die hellste Stelle im Bild weiß repräsentiert. Die R-, G- und B-Werte der hellsten Bildstellen werden analysiert. Daraus ergeben sich Korrekturwerte für die einzelnen Kanäle. Mit diesen Werten wird das gesamte Bild ausbalanciert. Der Algorithmus ist unbrauchbar, wenn die hellste Stelle nicht weiß entspricht. Kritisch ist außerdem, dass helle Bildstellen oftmals übersteuerte Reflexe darstellen. [25][26]

4 Neues Verfahren zum automatischen Weißabgleich einer DSC

4.1 Prinzip des Verfahrens

Für einen präzisen automatischen Weißabgleich ist die Ermittlung der beleuchtenden Lichtfarbe einer Szene notwendig (s. Kap. 3.3.2). Nach heutigem Stand der Technik werden in der kameraspezifischen Verarbeitungssoftware Rechenvorschriften verwendet, die die Lichtfarbe der Beleuchtung im digitalen Signal schätzen. Das neue Verfahren gewinnt die Information anhand eines messtechnischen Prozesses. Dieser Prozess untersucht den durch Reflexion an Körperoberflächen entstandenen polarisierten Lichtanteil einer Szene.

Der remittierte Lichtanteil bestimmt durch die spektralen Absorptionseigenschaften eines Körpers bedingt seine Farbigkeit. Durch die Streuvorgänge im Körperinnern ist dieser Lichtanteil unpolarisiert. Dagegen geschieht die Reflexion an matten und glatten Oberflächen nahezu wellenlängenunabhängig. Diese definitionsgemäß unbunten Reflexe beinhalten die Information über die beleuchtende Lichtfarbe. Ihre spektrale Zusammensetzung entspricht der gesuchten Information für den Weißabgleich.

Ausschlaggebend für das Gelingen des Verfahrens ist die Trennung der durch Remission und Reflexion entstandenen Signalanteile. Der reflektierte Lichtanteil lässt sich mittels der Erstellung von mindestens zwei Bildern, die unter verschiedenen Polarisationsrichtungen aufgenommen wurden, detektieren. Die Veränderung der Polarisationsrichtung wird durch die Verwendung eines Polfilters erreicht, dessen Ausrichtung zwischen den Aufnahmen verändert wird. Dadurch wird der polarisierte Reflexionsanteil unterschiedlich stark beim Passieren des Filters absorbiert. Die unpolarisierten Remissionsanteile bleiben von dieser Veränderung der Polfilterstellung unbeeinflusst.

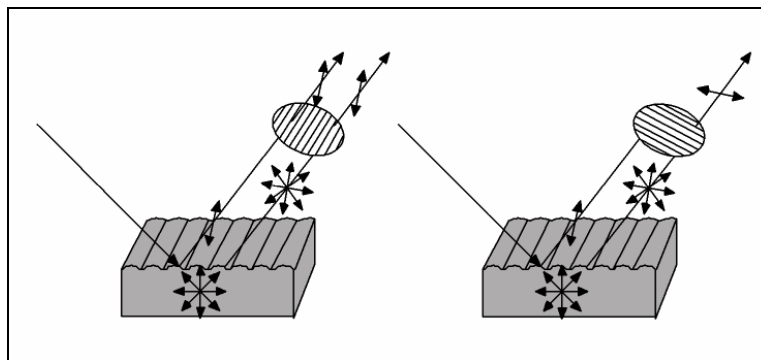


Abb. 20: Verschiedene Polfilterstellungen

Zur Detektion des reflektierten Lichtanteils werden zwei dieser Bilder voneinander subtrahiert. Die Information über den remittierten farbigen Lichtanteil der Szene wird dadurch entfernt. Man gewinnt den polarisierten Lichtanteil mit der Information über die beleuchtende Lichtfarbe der Szene.

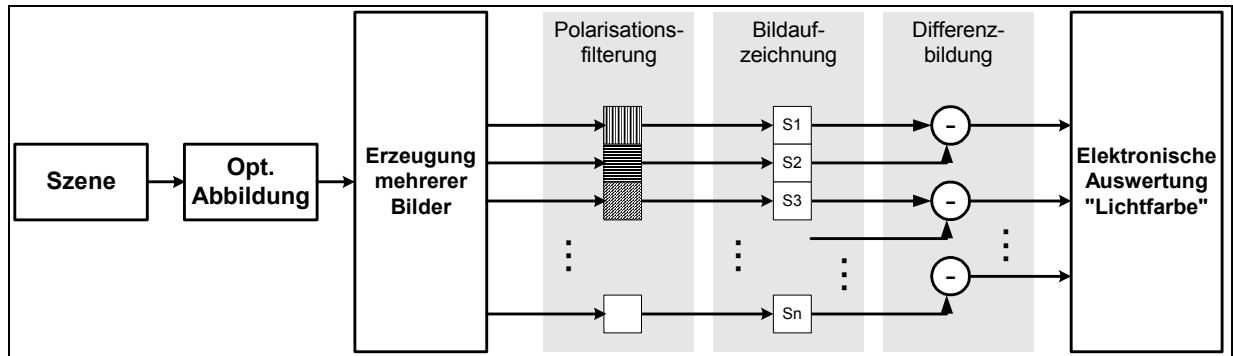


Abb. 21: Schema des Verfahrens zur Bestimmung der beleuchtenden Lichtfarbe

Das Verhältnis der gewonnenen Lichtfarbwerte entspricht dem Maß für das Ausbalancieren der einzelnen Farbkanäle für einen automatischen Weißabgleich. Die Ortsauflösung der Information ermöglicht sowohl einen lokalen als auch einen globalen Weißabgleich. [27]

4.2 Bildaufzeichnung

In dieser Arbeit werden die Aufnahmen mit einer digitalen 1-Sensor-Spiegelreflexkamera aufgezeichnet, deren Optik mit einem manuell verstellbaren Polfilter kombiniert ist. Die Szene wird insgesamt mindestens dreimal abgebildet. Die Aufnahmen entstehen unter verschiedenen Polarisationsrichtungen durch Veränderung der Transmissionsrichtung des Filters. Entscheidend ist, dass bei allen Aufnahmen statische Bedingungen existieren, die durch folgende Voraussetzungen erfüllt werden:

- Aufzeichnung von deckungsgleichen Bildern
- Intensitätskonstanz der Bildsignale

Ein effizientes Ergebnis wird durch die Gewährleistung von deckungsgleichen Bildern erzielt. Abweichungen von der Ortsinformation führen zum Kantenversatz und verursachen Messfehler im Nutzsignal des Differenzbildes. Da hier mit einem Laboraufbau des Verfahrens gearbeitet wird, unterliegt diese Forderung starken Schwankungen. Das Verstellen der Filterposition zur Veränderung der Polarisationsrichtung wird manuell

durchgeführt. Aus diesem Grund entstehen die unterschiedlichen Aufnahmen zeitlich versetzt. Problematisch ist deshalb das Vorhandensein von Bewegungen in der Szene. Motive wie Wolkenhimmel, strömende Gewässer, Wind in Laubbäumen u. ä. eignen sich daher nicht für die Untersuchung. Grundvoraussetzung ist auch ein stabiler Kamerastand und ein vorsichtiger Umgang bei der Verstellung der Filterposition, um Veränderungen des Bildausschnittes zu vermeiden.

Die intensitätskonstante Darstellung der Bildsignale wird durch die Verwendung der gleichen Blenden-Zeit-Kombination und Beibehaltung der ISO-Zahl erreicht. Außerdem darf sich die Beleuchtungssituation in der Szene nicht ändern. Dies ist wiederum bei Außenaufnahme schwierig einzuhalten, da die Beleuchtungssituation z.B. bei bewölktem Himmel zwischen den Aufnahmen wechselhaft sein kann.

4.3 Differenzbildung und elektronische Weiterverarbeitung

Wie genau die aus dem beschriebenen Verfahren gewonnenen Informationen über die beleuchtende Lichtfarbe für einen Weißabgleich weiterverarbeitet werden, ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Für die folgenden Betrachtungen kommt ein Algorithmus zum Einsatz, der die Differenzbildung zweier Bilder durchführt und nach entsprechender Analyse einen einfachen Weißabgleich anwendet.

Der Algorithmus ist an der Fachhochschule Köln entwickelt worden. Für die Entwicklung kam die Software MATLAB der Firma *The MathWorks, Inc* zum Einsatz. Diese Software ist für die Berechnungen mit Matrizen ausgelegt und eignet sich speziell für die Anwendung in der Bildverarbeitung.

Im Folgenden werden die einzelnen Verarbeitungsschritte im Algorithmus näher erläutert. Zu Beginn werden zwei Bilder geladen. Sie sind unter statischen Bedingungen entstanden und deshalb inhaltlich deckungsgleich. Da sie jedoch unter verschiedenen Polfilterstellungen aufgezeichnet wurden, unterscheiden sie sich hinsichtlich der polarisierten Lichtinformation.

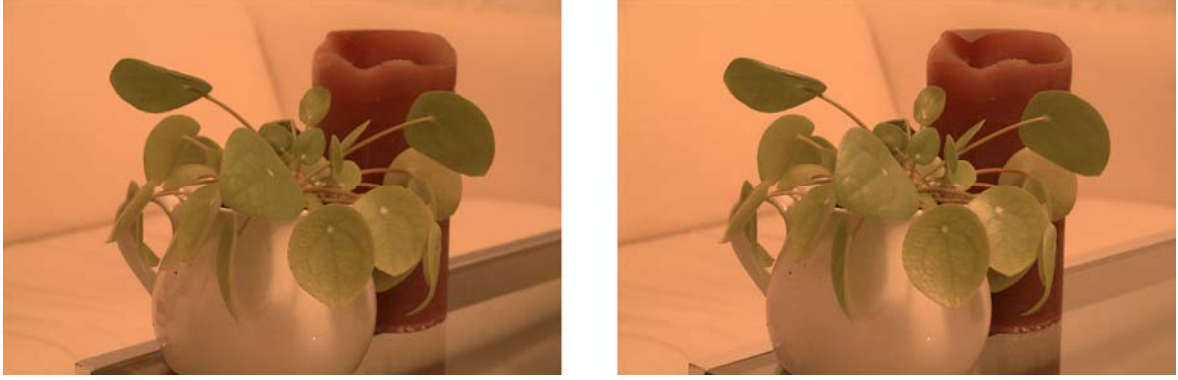


Abb. 22: Zwei unter verschiedenen Polarisationsrichtungen entstandene Bilder²

4.3.1 Maskierung der beiden unterschiedlich polarisierten Bilder

Die beiden Bilder werden zunächst pixel- und kanalweise bezüglich ihrer gültigen Information analysiert. An den Rändern des Histogramms werden dazu Schwellenwerte definiert $0.001 < RGB < 0.96$, damit die über- und untersteuerten Bildinformationen für die weitere Bildanalyse ausgeblendet werden.

Schwellwertoperationen verwendet man in der Bildverarbeitung zur Segmentierung von digitalen Bildern. Die Bildpunkte werden verschiedenen Segmenten zugeteilt. Deren Zuordnung ist abhängig von einem definierten Schwellwert a_{th} und erfolgt durch den Vergleich des Intensitätswertes eines Bildpunktes mit dem Schwellwert a_{th} . Jedem Bildpunkt wird einer dieser festgelegten Intensitätswerte a_0 oder a_1 zugeteilt,

$$f_{th}(a) = \begin{cases} a_0 & \text{für } a < a_{th}, \\ a_1 & \text{für } a \geq a_{th} \end{cases}$$

wobei $0 < a_{th} \leq a_{max}$. Bei einer Anwendung mit nur einem Schwellwert wird das Bild mit $a_0 = 0$ und $a_1 = 1$ binarisiert, d.h. es werden zwei Segmente gebildet. Diese Operation ist im Histogramm sichtbar. Alle Verteilungen sind nur noch auf zwei Einträge an den Stellen a_0 oder a_1 abgebildet. [28]

² Unterschied sichtbar an den Reflexen auf der Glasplatte und den Blättern der Pflanze

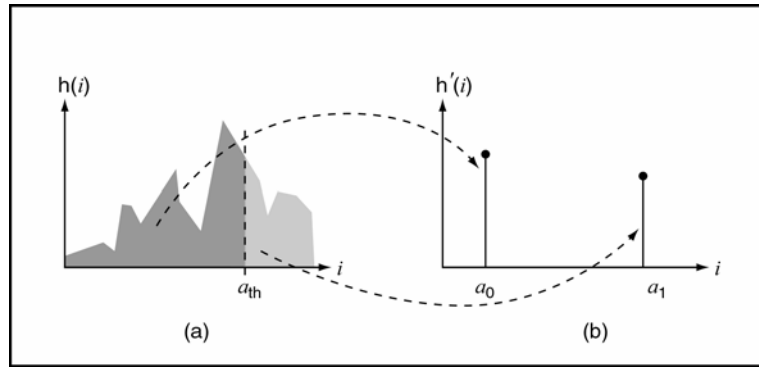


Abb. 23: Auswirkung der Schwellwertoperation im Histogramm mit dem Schwellwert a_{th}

Hier liefert das Ergebnis dieser Analyse ein Maskenbild, das für beide Bilder die gültigen und ungültigen Bildinhalte definiert. Gültige Pixel sind darin weiß dargestellt, die ungültigen Pixel schwarz.

4.3.2 Herstellung des Beleuchtungsbildes

Im weiteren Verlauf entsteht das Beleuchtungsbild, das die linear polarisierte Beleuchtungsinformation beinhaltet. Dazu wird von den beiden Bildern pixel- und kanalweise die Differenz gebildet.

$$Diff_R(x, y) = R_1(x, y) - R_2(x, y)$$

$$Diff_G(x, y) = G_1(x, y) - G_2(x, y)$$

$$Diff_B(x, y) = B_1(x, y) - B_2(x, y)$$

Aufgrund der statischen Bedingungen bei der Bildaufzeichnung, fällt somit die deckungsgleiche Bildinformation weg. Sie beinhaltet lediglich den remittierten Anteil der abgebildeten Szene. Das verbleibende Bild ist vorzeichenbehaftet und liefert die Information über die beleuchtende Lichtfarbe, da sie die an den Objektoberflächen reflektierte Strahlung darstellt. Diese Information ist für die weitere Untersuchung des Algorithmus entscheidend. Zur Berechnung werden nur die anhand der Maske ausgewerteten gültigen Pixelinformationen weiterverwendet.



Abb. 24: Durch Differenzbildung entstandenes Beleuchtungsbild



Abb. 25: Logarithmiertes Beleuchtungsbild

4.3.3 Maskierung des Beleuchtungsbildes

Das entstandene Beleuchtungsbild wird nach dieser Berechnung nochmals auf seine gültigen Informationsinhalte geprüft. Dafür werden die gleichen Schwellenwerte (positiv und negativ) benutzt. Nach Vereinigung dieser neuen mit den bisherigen ungültigen Pixeln ist das Ergebnis wiederum ein Maskenbild, das für die nachfolgenden Verarbeitungsschritte eingesetzt wird. Die weißen Bildinhalte des Maskenbildes stellen die auswertbaren Bereiche mit polarisierter Lichtinformation dar.

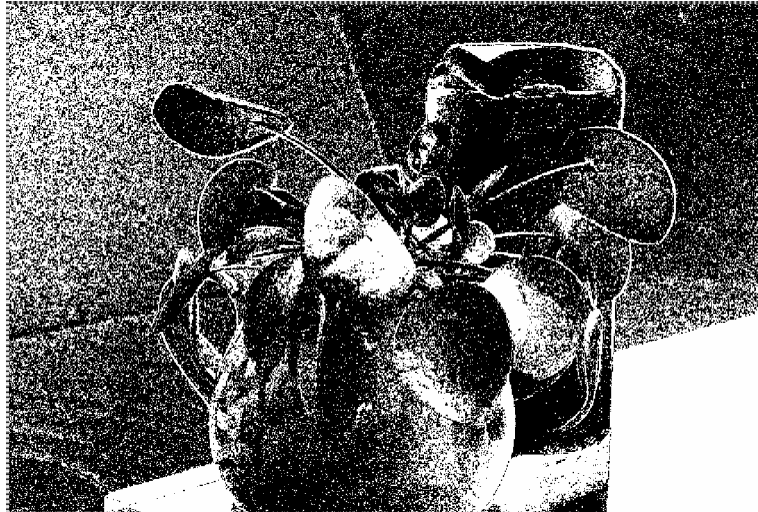


Abb. 26: Maskenbild mit ungültigen schwarzen Pixeln und gültigen weißen Pixeln

4.3.4 Bestimmung der Lichtfarbe

Die Bestimmung der Lichtfarbe geschieht durch eine Histogrammauswertung der Farborte aller gültigen Pixel des Beleuchtungsbilds.

Die Helligkeitsverteilung des Beleuchtungsbildes soll dabei ohne Einfluß sein. Entscheidend ist allein die Richtung und nicht die Länge (=Intensität) der pixelweisen RGB-Farbvektoren. Die Richtung definiert die sog. Farbart.

Dazu wird das Beleuchtungsbild in eine 2-dimensionale Darstellung der Farbart (analog zur CIE Farbtafeldarstellung) transformiert:

$$r = \frac{R}{R + G + B}$$
$$g = \frac{G}{R + G + B}$$

Vorteil dieser Darstellung ist außerdem, dass durch die Verhältnisbildung auch negative Beleuchtungsbildanteile zu positiven Farbarten $0 < r < 1$ und $0 < g < 1$ führen, weil die Farbwerte R,G,B – bis auf untersteuerte Bereiche – nur gemeinsam entweder positiv oder negativ werden.

Die r- und g-Farbverhältnisse definieren ein neues 2D-Koordinatensystem, über dem die Häufigkeiten aller gültigen Pixel des Beleuchtungsbildes als Histogramm dargestellt werden:

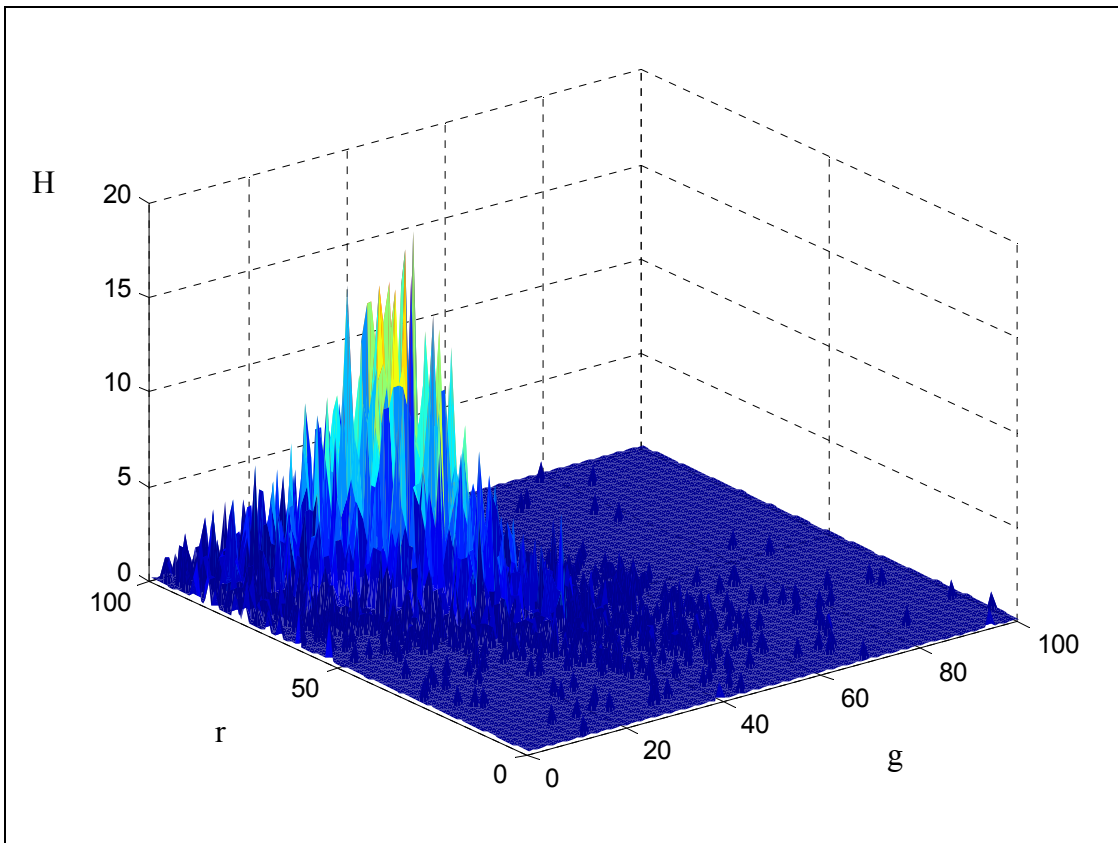


Abb. 27: Histogramm mit Häufungspunkt

Die Messergebnisse zeigen, dass die dominante Beleuchtung einen Häufungspunkt im Histogramm des Beleuchtungsdichtebildes bewirkt. Je nach Signalqualität des Beleuchtungsbildes ist dieser Häufungspunkt mehr oder weniger ausgeprägt. Um auch bei stark verrauschtem Nutzsignal und entsprechend flachem Histogramm eine möglichst treffsichere Bestimmung der Lichtfarbe zu gewährleisten, wird das Histogramm wie folgt ausgewertet:

Als Zentrum des Häufungspunktes wird der Punkt angenommen, dessen Farbort am häufigsten vorkommt. Der Häufigkeitswert in diesem Punkt wird ermittelt und nur noch Farborte berücksichtigt, die mindestens 50% dieses Wertes erreichen.

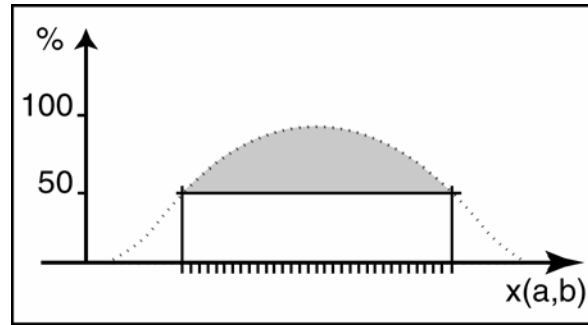


Abb. 28: Wichtung des Weißabgleichs

Diese Schwelle verhindert einen Messfehler, der bei niedrig ausgesteuertem Signal auftreten kann. Im Verfahren wird bei der Erstellung des Beleuchtungsbildes der untersteuerte Bereich beim Schwellwert a_{th} abgeschnitten. Dies kann zum Verlust von Information eines niedrig ausgesteuerten Signals führen. In diesem Fall läge ein Mittelwert vor, der vom tatsächlichen Wert verschoben ist.

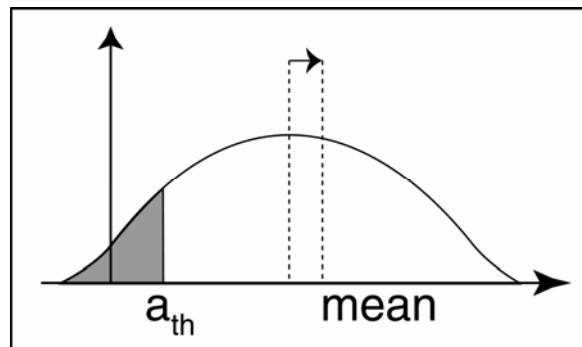


Abb. 29: Verschiebung des Mittelwertes durch Schwellwertoperation

Deshalb wird hier die Ermittlung der Korrekturwerte durch die Mittelung der Farborte oberhalb der Schwelle durchgeführt. Dies hat zur Folge, dass alle berücksichtigten Farborte mit gleicher Wichtigkeit in die Mittelung einfließen. Auf diese Weise wird der Flächenschwerpunkt der berücksichtigten Farborte, deren Häufigkeit $h > h_{max}/2$ liegt, ermittelt. Alle berücksichtigten Farborte werden dabei gleich stark gewichtet unabhängig von ihrer Häufigkeit.

$$\begin{pmatrix} \bar{r} \\ \bar{g} \end{pmatrix} = \frac{\begin{pmatrix} r_1 \\ g_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_2 \\ g_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_3 \\ g_3 \end{pmatrix} + \dots + \begin{pmatrix} r_N \\ g_N \end{pmatrix}}{N}$$

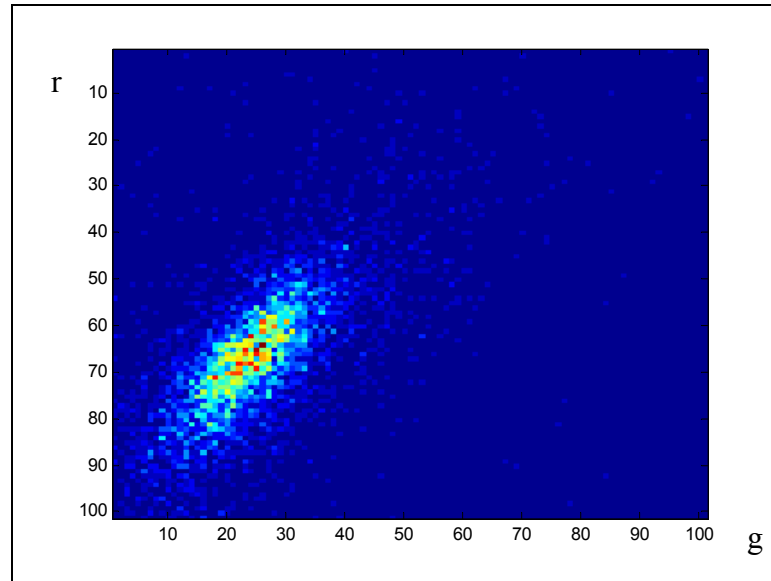


Abb. 30: Darstellung der berücksichtigten Farborte (cyan) um das Zentrum (rot) des Histogramms herum

4.3.5 Weißabgleich

Mit den relativen Farbwerten

$$r_w = \bar{r} = \frac{R_w}{R_w + G_w + B_w}$$

$$g_w = \bar{g} = \frac{G_w}{R_w + G_w + B_w}$$

ergibt sich der Blauanteil der Lichtfarbe unmittelbar zu

$$b_w = \frac{B_w}{R_w + G_w + B_w}$$

$$= 1 - r_w - g_w$$

Somit stehen alle benötigten Informationen zur Verfügung, um auf einem der 2 Ausgangsbilder den Weißabgleich durchzuführen.

Um den Helligkeitseindruck des abgeglichenen Bildes nicht zu verändern, werden die relativen Farbwerte noch auf ihr geometrisches Mittel $\sqrt[3]{r_w \cdot g_w \cdot b_w}$ normiert, so dass sich die Vorschrift für den pixelweisen Weißabgleich gemäß

$$R' = R \cdot \frac{\sqrt[3]{r_w \cdot g_w \cdot b_w}}{r_w}$$

$$G' = G \cdot \frac{\sqrt[3]{r_w \cdot g_w \cdot b_w}}{g_w}$$

$$B' = B \cdot \frac{\sqrt[3]{r_w \cdot g_w \cdot b_w}}{b_w}$$

ergibt.



Abb. 31: Gegenüberstellung von unkorrigiertem und korrigiertem Rohdaten-Bild

4.4 Gestalt des Nutzsignals

Die Auswertung der Lichtfarbe aus dem Differenzbild ist von der Stärke des Nutzsignalpegels abhängig. Je stärker der Pegel des Nutzsignals ist, desto stabiler arbeitet das Verfahren. Die Gestalt des Nutzsignals ist im Wesentlichen durch

- die Intensität des reflektierten Lichtanteils,
- den Polarisationsgrad des reflektierten Lichtanteils und
- die Polarisationsrichtungen des Bildpaares bei der Differenzbildung

charakterisiert.

Ausschlaggebend ist zunächst einmal, wie groß der unbunte Reflexionsanteil einer Szene ist, der den Sensor bei der Bildaufzeichnung trifft. Die Größe wird von der Intensität und dem Polarisationsgrad des reflektierten Lichtes bestimmt. Entscheidend sind dabei die Ausrichtungen der Körperoberflächen zur Lichtquelle und zur Kamera und die Beschaffenheit der Oberflächen. In einer Szene mit dreidimensionalen Objekten ergibt sich folglich ein lokal variabler Nutzsignalpegel.

4.4.1 Intensität des reflektierten Lichtanteils

Die Intensität des reflektierten Lichtanteils ist maximal, wenn das einfallende Licht der dominanten Lichtquelle auf eine glatte Oberfläche fällt, die sich wie ein idealer Spiegel verhält. In diesem Fall wird das Licht vollständig gerichtet reflektiert. Beobachtet wird dieser Reflex nur unter dem Ausfallswinkel, der gleich dem Einfallswinkel ist.

An einer idealen rauen Oberfläche wird der Reflex der dominanten Lichtquelle in alle Richtungen gleich intensiv gestreut. Die Reflexion beschreibt eine Kugelform, bei der sich die Intensität auf alle Richtungen verteilt. Durch die Streuung ist die Intensität an rauen Oberflächen viel schwächer.

Es ist unwahrscheinlich, dass beide idealen Fälle in der Natur vorkommen. Realistischer ist die Beschreibung der Reflexion an Oberflächen mit Hilfe eines Spiegelmodells. Den Aufbau einer Oberfläche kann man sich als die Ansammlung einer Vielzahl willkürlich ausgerichteter, marginaler Spiegel vorstellen. Jeder einzelne Spiegel verhält sich, wie der oben beschriebene ideale Spiegel. Im Unterschied zur glatten Oberfläche mit einer Ausrichtung, sind hier jedoch viele verschiedenen Ausrichtungen möglich. Jeder Spiegel zeigt bei der Reflexion das Spiegelbild einer Lichtquelle. Dabei beeinflusst die Ausrichtung des Spiegels die Richtung der Spiegelung. Je mehr Spiegel mit unterschiedlichen Ausrichtungen vorhanden sind, desto rauer ist die Oberfläche.

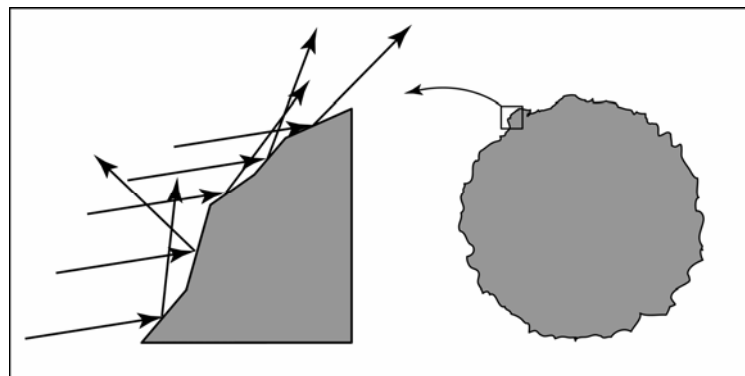


Abb. 32: Spiegelmodell

Das beschriebene Modell zeigt, dass in der Natur bei der Reflexion an allen Oberflächen der Faktor der Streuung mitberücksichtigt werden muss. Demnach beschreibt die Reflexion eine Keulenform mit Reflexionsmaximum.

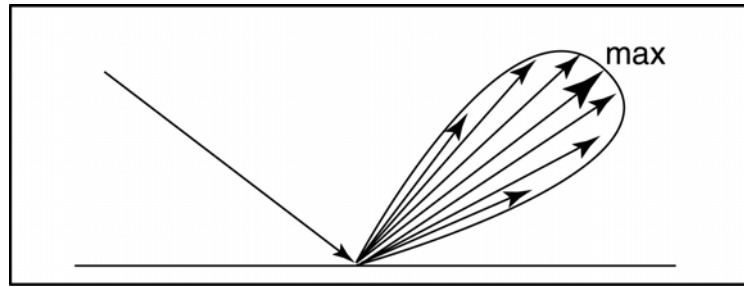


Abb. 33: Gestreute Reflexion mit Reflexionsmaximum

Eine Oberfläche mit glatter Charakteristik hat bei der Reflexion eine schmale Keule mit ausgeprägtem Reflexionsmaximum. Dagegen bildet die stark gestreute Reflexion an einer rauen Oberfläche eine breite Keule aus, deren Reflexionsmaximum nicht so dominant ist.

Alle reflektierten Strahlen innerhalb der Keule weisen polarisierte Eigenschaften auf und können somit im Nutzsignal erfasst werden. Dabei ist der Polarisationsgrad der reflektierten Lichtanteile jedoch variabel. Maximal ist er bei Erreichen der Brewster-Bedingung.

Einfluss auf die Intensität des reflektierten Lichtanteils hat außerdem die Art der Beleuchtung. Bei senkrechtem Strahlungseinfall bildet die Beleuchtungsstärke das Verhältnis der Strahlungsleistung pro Fläche:

$$E_0 = \frac{I}{r^2} \quad .$$

Trifft der Lichtstrom unter einem schrägen Winkel auf die beleuchtete Fläche, nimmt die Beleuchtungsstärke um den Faktor $\cos \varphi$ ab.

$$E_\varphi = E_0 \cos \varphi \quad .$$

Hat die Lichtquelle die Gestalt eines Flächenstrahlers, gilt für die Beleuchtungsstärke:

$$E = L \cdot \Omega \quad \text{mit} \quad \Omega = \frac{A}{r^2} \quad .$$

Eine beleuchtete Fläche fungiert als Sekundärstrahler. Dabei ist zu unterscheiden, ob die Oberfläche eine glatte oder matte Charakteristik aufweist. Diesen Unterschied verdeutlicht die folgende Gegenüberstellung. Die Zahlenwerte orientieren sich an der Situation im Laborversuch. Angenommen im Versuch trifft das Licht einer Quelle mit $I = 1000\text{cd}$ und im Abstand von 3 m senkrecht auf eine matte Oberfläche, die ca. 4% reflektiert. Daraus folgt:

$$E = \frac{I}{r^2} = \frac{1000}{9} \frac{cd}{m^2} \approx 111 \frac{cd}{m^2}$$

$$\Rightarrow L_{\text{matt}4\%} = \frac{1}{\pi} \cdot \rho \cdot E \cdot \Omega_0^{-1} = \frac{1}{\pi} \cdot 0,04 \cdot 111 \frac{cd}{m^2} \approx 1,41 \frac{cd}{m^2}$$

Dagegen beobachtet man an einer glatten Oberfläche, die mit einem Flächenstrahler vom Ausmaß $A = 0,5 \text{ m}^2$ bestrahlt, die Leuchtdichte des Flächenstrahlers gewichtet mit dem Reflexionsgrad der Oberfläche::

$$L_{\text{ger}4\%} = \frac{I}{A} \cdot \rho = \frac{1000}{\pi \cdot 0,5} \cdot 0,04 \frac{cd}{m^2} \approx 25,5 \frac{cd}{m^2}.$$

Der Reflex an einer glatten Oberfläche beeinflusst die Intensität des Bildsignals demnach wesentlich stärker, als an einer matt reflektierenden Oberfläche.

4.4.2 Polarisationsgrad des reflektierten Lichtanteils

Trifft das einfallende Licht unter dem Brewsterwinkel auf die reflektierende Körperoberfläche, ist der Polarisationsgrad maximal (s. 2.2.3.3). Dann ist das reflektierte Licht vollständig linear polarisiert. Ist ein Analysator im Strahlengang angebracht, wird in Abhängigkeit von dessen Stellung die hindurch gelassene Intensität des Lichts beeinflusst. Dabei können maximale und minimale Intensitätswerte festgestellt werden. Auf den Polarisationsgrad wirkt dies folgendermaßen:

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Demnach ist der Polarisationsgrad bei natürlichem Licht ($I_{\max} = I_{\min}$) 0 und bei vollständig linear polarisiertem Licht ($I_{\min} = 0$) 1. Bei teilweise linear polarisiertem Licht liegen die Werte zwischen 0 und 1.

Wichtig ist zu erkennen, dass der Polarisationsgrad der reflektierten Strahlenteile nur von dem Öffnungswinkel, der durch die Positionen der Lichtquelle und der Kamera bezogen auf den Scheitelpunkt, der durch das Objekt festgelegt ist, abhängt, und zwar unabhängig von der Ausrichtung der Objektoberfläche, was sich in den Messergebnissen bestätigt (s. 6.4). Die Grundlage hierzu gibt uns das obige Spiegelmodell.

4.4.3 Polarisationsgrad reflektierter und remittierter Lichtanteile

Als Polarisationsgrad eines Bildpaares unterschiedlicher Polarisationsrichtungen wird in dieser Arbeit die Definition

$$P = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}$$

verwendet. Die Intensität I repräsentiert dabei die pixelweisen R/G/B-Bildinformationen und beinhaltet neben den reflektierten I_{ref} auch die remittierten Strahlanteile I_{rem} :

$$\begin{aligned} P &= \frac{I_{1ref} + I_{1rem} - I_{2ref} - I_{2rem}}{I_{1ref} + I_{1rem} + I_{2ref} + I_{2rem}} \\ &= \frac{I_{1ref} - I_{2ref}}{I_{1ref} + I_{1rem} + I_{2ref} + I_{2rem}} \end{aligned}$$

Zu beachten ist, dass $I_{1rem}=I_{2rem}$ gilt, weil der unpolarisierte Remissionsanteil unter verschiedenen Polfilterrichtungen gleich übertragen wird.

Der Polarisationsgrad obiger Definition bildet das Verhältnis von Nutzsignal (=Differenzsignal) zur Summe der Einzelintensitäten und ist als relatives Maß unabhängig von der Bildhelligkeit bzw. Belichtung. Er macht eine wichtige Aussage über das potentielle Nutzsignal einer Körperoberfläche für die Auswertung der polarisierten Reflexe für das neue Weißabgleichsverfahren. Besonders hohe Polarisationsgrade werden erreicht bei

- glatten Oberflächen, in denen die Reflexhelligkeit die Remission deutlich übersteigt (Spiegelbild der Lichtquelle) und bei
- sehr dunklen Oberflächen, bei denen der Remissionsanteil so niedrig ist, dass er gegenüber den Reflexen vernachlässigbar ist.

Es ist allerdings zu bedenken, dass diese ausgezeichneten Oberflächentypen eine völlig unterschiedliche Belichtungsstrategie benötigen, um zu vergleichbaren Nutzsignalqualitäten zu führen. Während spiegelnde Reflexe aufgrund ihrer hohen Helligkeitswerte Unterbelichtung benötigen, um nicht zu übersteuern, ist für die dunklen Objekte mit matten Oberflächen Überbelichtung erforderlich, um diese Bildstellen vernünftig auszusteuern.

4.4.4 Polarisationsrichtungen

Der Nutzsignalpegel bei der Differenzbildung von zwei unterschiedlich polarisierten Bildern ist dann maximal, wenn das eine Teilbild bei vollständig polarisiertem Licht und das andere bei unpolarisiertem Licht aufgezeichnet wurden. Deshalb ist es bei der Wahl des Bildpaares sinnvoll, senkrecht zueinander stehende Polarisationsrichtungen voneinander zu subtrahieren.

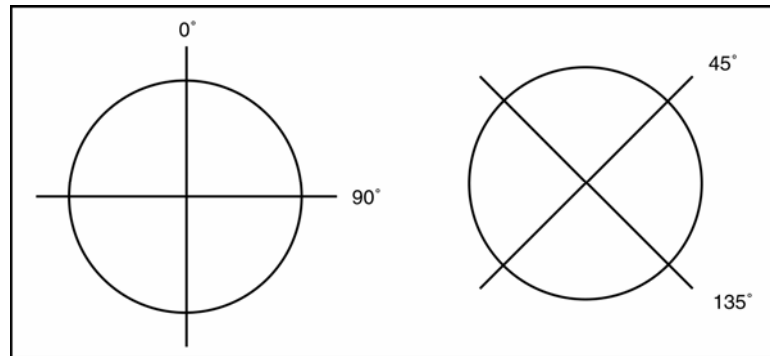


Abb. 34: Senkrecht zueinander ausgerichtete Polfilterstellungen

In der Praxis werden unterschiedliche Polarisationsrichtungen bei der Aufzeichnung der Bilder vorkommen, deren Orientierung unbekannt ist. Um ein möglichst robustes Verfahren zu gewährleisten, sind daher mehrere Bildpaare notwendig. Zur genauen Untersuchung wird das Bildpaar in Betracht gezogen, das den größten Nutzpegel bei der Differenzbildung erreicht.

4.5 Untersuchungsziele der Diplomarbeit

In der Praxis ist das vorgestellte Verfahren bisher noch nicht erprobt. Ziel dieser Diplomarbeit ist es, durch Grundlagenuntersuchungen Erkenntnisse für die spätere Optimierung des Verfahrens zu gewinnen.

Zunächst wird das Verfahren auf die Funktionalität seiner zugrunde liegenden physikalischen Eigenschaften untersucht. Dabei soll herausgearbeitet werden, welchen Einfluss die Oberflächen- und Materialeigenschaften verschiedener Objekte auf die Gestalt des Nutzsignals haben. Untersucht werden Einflüsse im Bezug auf:

- Änderung der Lichtfarbe
- Größe des Nutzsignals

Für diese Betrachtungen werden Bilder unter definierten Studiobedingungen aufgenommen und ausgewertet.

Die Untersuchung dient einerseits als Bestandsaufnahme der zugrunde liegenden physikalischen Phänomene. Auf Basis dieser Ergebnisse soll eine fundierte Aussage über die Funktionskriterien des Verfahrens formuliert werden.

Andererseits sollen durch die Ergebnisse Tendenzen festgestellt und Zusammenhänge erschlossen werden, die bei der Weiterentwicklung des Verfahrens zur Verbesserung einfließen können. Ein wichtiger Punkt dabei ist, kritische Situationen zu lokalisieren, bei denen Schwierigkeiten in der Durchführung des Verfahrens auftreten. Diese Erkenntnisse sind ebenfalls wichtig für die Optimierung des Verfahrens und der beteiligten Algorithmen der Bildauswertung.

Ein weiterer Aspekt der Untersuchung ist, eine erste Aussage zu treffen, inwiefern sich das Verfahren als praxistauglich darstellt.

5 Versuchsdurchführung

5.1 Aufbau

Kamera, Lichtquelle und Objekt sind bei diesem Versuchsaufbau alle in gleicher Höhe angeordnet. Gemeinsam bilden sie ein Dreieck, das eine parallel zum Boden liegende Ebene aufspannt. Diese Ebene liegt in der durch einfallenden und reflektierten Strahl definierten Einfallsebene. Durch diese Wahl der Anordnung ist die Orientierung des für die Untersuchung wichtigen linear polarisierten Lichtanteils bekannt. Denn das durch Reflexion linear polarisierte Licht schwingt senkrecht zur Einfallsebene.

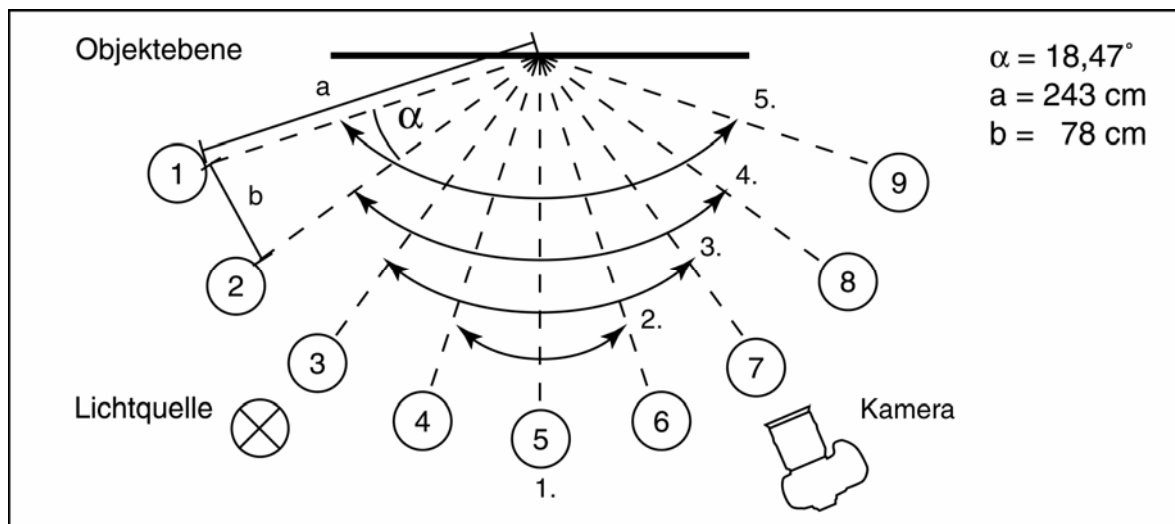


Abb. 35: Versuchsaufbau im Studio

Es gibt 9 definierte Standorte für Kamera und Lichtquelle (s. Abb. 35). Die Distanz der Standorte zur Objekzebene bleibt immer gleich und beträgt $a = 243\text{ cm}$. Auch der Abstand der Standorte zueinander ist kontinuierlich. Er misst $b = 78\text{ cm}$. Somit ergibt sich eine symmetrische, kreisförmige Anordnung, wobei sich Standort 5 genau senkrecht zur Objekzebene befindet. In der Objekzebene ist ein Testchart angebracht, dass senkrecht zur Einfallsebene ausgerichtet ist. Bei der Versuchsdurchführung kommen folgende 5 Positionen von Lichtquelle und Kamera zum Einsatz:

Position 1: Lichtquelle Standort 5 / Kamera Standort 5

Position 2: Lichtquelle Standort 4 / Kamera Standort 6

Position 3: Lichtquelle Standort 3 / Kamera Standort 7

Position 4: Lichtquelle Standort 2 / Kamera Standort 8

Position 5: Lichtquelle Standort 1 / Kamera Standort 9

An der jeweiligen Position wird das Objekt immer zentriert von der Lichtquelle beleuchtet. Die Kamera ist dabei so ausgerichtet, dass sie genau den von der Objektebene ausfallenden Strahl der Lichtquelle beobachtet. In diesem Fall gilt für die Winkelbeziehung von Lichtquelle und Kamera, dass der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist. Dadurch entstehen vom Kamerastandort aus betrachtet auf den glatten Objektoberflächen Reflexe, die das Spiegelbild der Lichtquelle zeigen.

Von Position zu Position vergrößert sich der Öffnungswinkel zwischen Lichtquelle und Kamera. Dabei geht die Winkelhalbierende immer durch den Standort 5. Durch die Vergrößerung des Öffnungswinkels wird der Polarisationsgrad des reflektierten Lichtanteils verändert. Die Beleuchtungsstärke E nimmt dabei ab.

Zur Variation der Reflexanteile wird in jeder Position zusätzlich noch die Objektebene um die vertikale Achse verschwenkt.

In der Ausgangsposition ist die Objektebene senkrecht zum Standort 5 ausgerichtet. Durch ein Schwenken der Objektebene senkrecht ausgerichtet auf die Standorte 6, 7 und 8 verschwinden die Reflexe auf den glatten Objektoberflächen am Testchart. Sinnvoll ist das Schwenken der Objektebene in den jeweiligen Positionen nur, solange das Testchart noch beleuchtet ist. Es macht also z. B. keinen Sinn, wenn die Lichtquelle am Standort 2 steht, die Objektebene senkrecht auf Standort 7 zu schwenken.

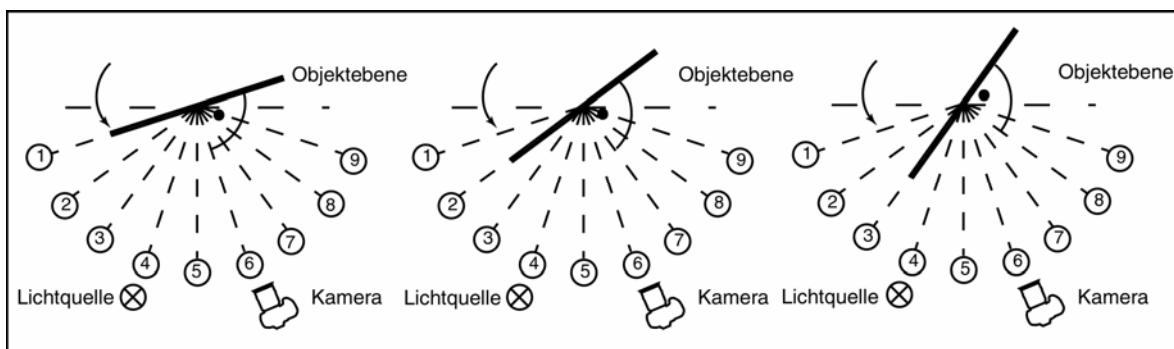


Abb. 36: Schwenken der Objektebene zur Veränderung der Oberflächenreflexion

5.2 Testchart

Zur Untersuchung der Reflexionseigenschaften von Körperoberflächen wurde ein spezielles Testchart erstellt. Auf dem Chart sind verschiedene Testoberflächen plan nebeneinander angebracht. Die Oberflächen unterscheiden sich aufgrund ihrer Beschaffenheit. Ihre Struktur ermöglicht die Klassifizierung in 4 Kategorien. Wir unterscheiden glatte, matte, verwinkelte und transparent beschichtete Oberflächen. Zu den glatten Oberflächen zählen das glatte Pflanzenblatt (6), das Glas (16) und die Keramikachel (20). Der Kork (4), die graue Pappe (5), schwarze Pappe (10) und gelbe Pappe (14), das matte Pflanzenblatt (7), das Linoleum (8), die weiße Wandfarbe auf Pappe (12), die Kachelrückseite (17), die mit grauem Mattlack besprühte Kachel (18), die mit rotem Metalliclack besprühte Kachel (19) und das Styropor (21) werden den matten Oberflächen zugeordnet. Das Gras (3), die Wolle (9) und der Samt (13) gehören zu den verwinkelten Oberflächen. Und das matte (11) und das glänzende Photo (15) werden den transparent beschichteten Oberflächen zugewiesen. Diese Objekte wurden als eine Auswahl der häufig in der Natur vorkommenden Oberflächenstrukturen gewählt.

Die Anordnung der Testobjekte entspricht der Abb. 34. In der später folgenden Auswertung wird für jedes Testobjekt die Ermittlung der Lichtfarbe separat durchgeführt. Dabei entspricht die Nummerierung der Testobjekte genau der Reihenfolge der einzelnen Messungen in der späteren Auswertung. Die erste Messung erfasst bei der Ermittlung das gesamte Testchart, die zweite Messung bezieht sich nur auf die Graukarte, die dritte auf das Grasmodell (Plastik) usw.

Bei der Auswertung des Testcharts werden 22 Messfelder dargestellt. Neben dem 1. Messwert ist auch das Messfeld (22) nicht aussagekräftig, da es sich um eine Leermessung des unbeleuchteten Hintergrunds handelt.

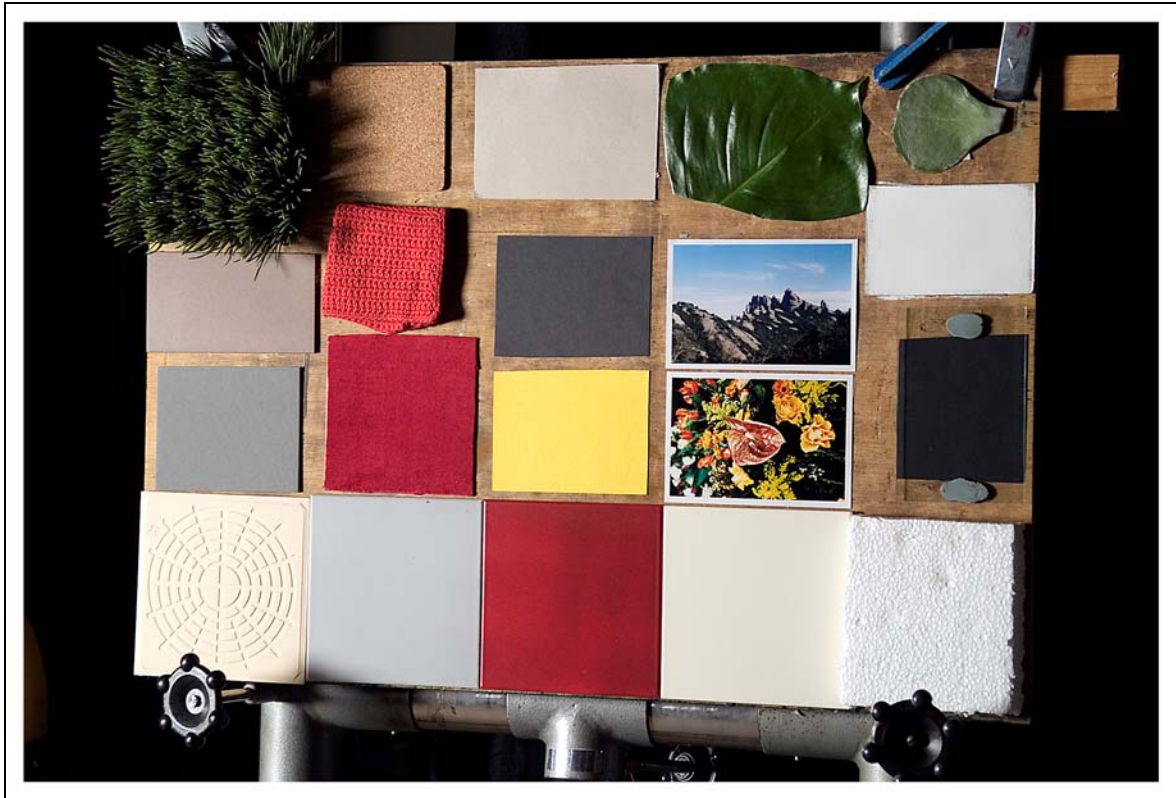


Abb. 37: Testchart im Versuchsaufbau

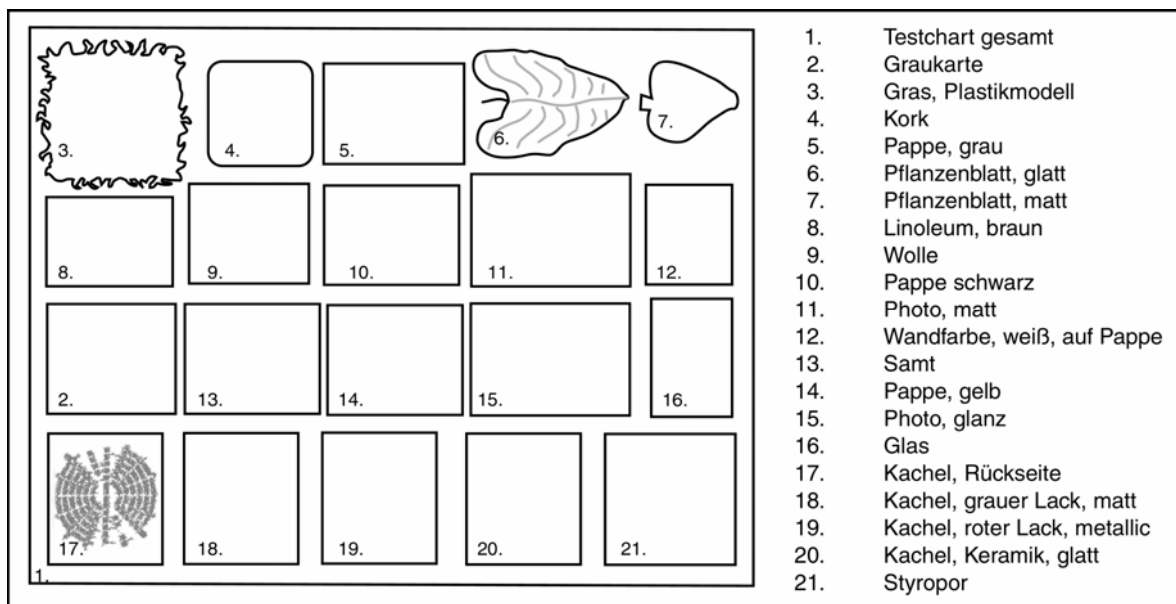


Abb. 38: Testchart mit klassifizierten Testoberflächen

5.3 Prüfkriterium

Die Graukarte auf dem Testfeld dient als Prüfungskriterium für das Verfahren. Optimal läuft das Verfahren, wenn die Graukarte nach Anwendung des Weißabgleichs ideal grau wiedergegeben wird ($R = G = B$). Außerdem fungiert die Abbildung der Graukarte im Originalbild als Referenz für die beleuchtende Lichtfarbe. Da die Graukarte spektral aseptiv grau ist, entspricht eine Verschiebung der Farbkanäle an dieser Stelle genau der beleuchtenden Lichtfarbe.

5.4 Workflow

5.4.1 Fuji FinePix S3 Pro

Im Rahmen der Versuchsdurchführung kam die Kamera Fuji FinePix S3 Pro zum Einsatz. Diese professionelle digitale Spiegelreflexkamera arbeitet mit der Super CCD SR Sensor Technik. Auf dem Chip befinden sich zwei unterschiedliche Typen von Pixeln, die S-Pixel mit hoher Lichtempfindlichkeit und die R-Pixel mit niedriger Empfindlichkeit. Mit dieser Technik kann die Kamera eine bis zu vierfache Erweiterung des Dynamikumfangs erreichen. Die Verbesserung wirkt sich speziell in der Aufzeichnung von Details in den Lichtern und Schatten eines Motivs aus. Auf einer Sensorgröße von 23,5 x 15,5mm umfasst die Auflösung des Bildsensors effektive 12,3 Mio. Pixel (6,17 Mio. S-Pixel; 6,17 Mio. R-Pixel). Insgesamt liefert dieser Chip eine verbesserte Bildqualität. Die Qualitätssteigerung wird durch eine erhöhte Lichtempfindlichkeit, ein verbessertes Rauschverhalten und eine optimierte Farbwiedergabe umgesetzt. [29]

5.4.2 Aussteuerung

Bei der Versuchsdurchführung werden drei Aussteuerungsvarianten erstellt. Die Belichtungswerte der Ausgangsmessung werden durch die Messung N an der Graukarte ermittelt und 1 Blendenstufen (N-1) unterbelichtet. Ausgehend von Messung N wird zur Untersuchung der dunkeln Objekte mit 1,5 Blendenstufen (N+1,5) überbelichtet. Für die Untersuchung der Reflexe an glatten Oberflächen, wird die Aufzeichnung unterbelichtet. Die Spotmessung wird separat am hellsten Reflex der Szene durchgeführt.

Für eine erfolgreiche Auswertung ist existentiell wichtig, dass die zusammengehörigen Bilder, mit denen durch Differenzbildung die Information der Lichtfarbe ermittelt werden

soll, unter gleichen Belichtungseinstellungen der Kamera aufgenommen werden, um die geforderte Intensitätskonstanz der aufgezeichneten Objekte zu erfüllen. Nur bei hinreichend erfüllter Intensitätskonstanz verschwinden durch die Differenzbildung die Remissionsanteile, die ansonsten das Ergebnis der Lichtfarbe unzulässig verfälschen würden. Die Kamera wird daher ausschließlich bei ausgeschalteter Belichtungsautomatik im manuellen Modus betrieben.

5.4.3 Polarisierung der Bilddaten

Die Aufzeichnung von unterschiedlich polarisierten Bildern wird im Versuch durch die Verwendung eines linearen Polfilters von *Hama* realisiert. Ein Nachteil des Filters ist die fehlende Kennzeichnung seiner Transmissionsrichtung.

Erstens erschwert dies eine präzise Justierung der verschiedenen Filterstellungen bei der Versuchsdurchführung. Abhilfe schafft in diesem Fall eine Markierungsskala auf dem Objektiv, die in Deckungsgleichheit mit dem zur Verstellung angebrachten Stift am Filterrand zu bringen ist. Bei den verschiedenen Bildmotiven kann so eine Reproduzierbarkeit der Winkel für die verschiedenen Filterstellungen garantiert werden.

Zweitens führt dies auch zu Schwierigkeiten bei der Festlegung der Winkel für die Polarisationsrichtungen. Ziel ist es, bei der später durchzuführenden Differenzbildung ein möglichst großes Nutzsignal zu gewinnen. Ausgehend von der Annahme, der Stift am Filter entspricht der Transmissionsrichtung, werden die Winkel bei 0° , 45° und 90° gewählt.

Dieser Wahl liegen folgende Erkenntnisse zugrunde:

- Durch den Versuchsaufbau ist die Orientierung des polarisierten Lichts senkrecht zur Einfallsebene bekannt. Infolgedessen ist die Festlegung auf 2 je senkrecht aufeinander stehende Bildpaare, hier $0^\circ/90^\circ$ und $45^\circ/135^\circ$, ausreichend. Theoretisch erreicht man durch senkrechte (Filterstellung 0°) und waagerechte (Filterstellung 90°) Ausrichtung des Filters zur Einfallsebene maximale und minimale Intensitätswerte des polarisierten Lichtanteils. Subtrahiert man anschließend diese beiden Bilder voneinander, erhält man den maximal möglichen Nutzsignalpegel.
- Diese Theorie führt außerdem zu der Annahme, dass der Polarisationsanteil in den unter 45° und 135° aufgezeichneten Bildern identisch ist. Deshalb wird eine dieser Aufzeichnungen überflüssig. Hier wird nur das 45° -Bild aufgezeichnet.

Somit reicht es bei diesem Versuch aus, jedes Motiv unter den drei Filterstellungen 0° , 45° und 90° abzubilden. Pro Bildmotiv entstehen also drei unterschiedlich polarisierte Bilder.

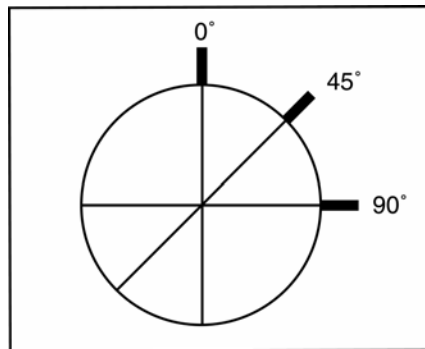


Abb. 39: Im Versuch verwendete Polfilterstellungen

5.4.4 Aufbereitung der Rohbilder

Für die im Anschluss folgende Auswertung sind in dieser Arbeit lineare Bilddaten erforderlich. Dies ermöglicht die Gewinnung der Reflexanteile durch die Differenzbildung verschieden polarisierter Aufnahmen.

Die Speicherung der Bilddaten erfolgt im Raw Format. Dieses kameramodellabhängige Dateiformat ermöglicht den Zugriff auf unverarbeitete Rohdaten. Die RAW Datei ist zunächst nicht zu entschlüsseln. Dazu wird ein geeigneter sog. RAW Konverter benötigt, der die Dateistruktur für die herstellerspezifischen Rohdaten kennt. Alle Konverter verwandeln die Rohdaten in ein Farbbild. Demosaicking und Weißabgleich der Bilddaten werden in jedem Konverter im Anschluss an die Entschlüsselung der Bilddaten durchgeführt. Nach diesen Prozessen wird die Datei nach der ISO/WD 17321 [30] immer noch als Rohdatei bezeichnet. Erst bei Anwendungen von nicht linearen Operationen, wie z.B. durch Colormanagement oder Gradationskurven, ist die Datei keine Rohdatei mehr. Üblicherweise kann der Anwender nur teilweise die Konvertierung beeinflussen. Außerdem kann nicht nachvollzogen werden, welche genauen herstellerspezifischen Verarbeitungsschritte noch im Hintergrund ablaufen.

Deshalb wird in dieser Untersuchung der von David Coffin entwickelte Konverter *Dcraw* benutzt. Dieses Konverterprogramm steht als Quellcode zur Verfügung und wird vom Entwickler als Download auf seiner Internetseite [31] frei angeboten. Somit ist die individuelle Weiterentwicklung und Modifizierung des Programms möglich.

Bei der Konvertierung durch *Dcraw* wird zunächst der Hersteller des zu verarbeitenden Raws ermittelt. Auf diese Weise wird die Wahl der entsprechenden Dekodierungsfunktion

durchgeführt. Es folgen die Verarbeitungsschritte der Konvertierung.

Dcraw ist ein Kommandozeilenprogramm das auch vorgegebene Parameter zur Steuerung annimmt. Die Liste mit den zur Auswahl stehenden Parametern wird angezeigt, wenn *Dcraw* nicht von der Kommandozeile aus aufgerufen wird. In dieser Arbeit werden folgende Parameter zur Einstellung gewählt:

- o 0: Output colorspace (0 : Raw)
- 4: Write 16-bit linear ppm

Mit dieser Auswahl werden die Bilddaten in linearer Form beibehalten. Es findet also keine Anpassung der Gradationskurve statt. Die Ausgabe erfolgt mit 16-Bit Farbtiefe. Gespeichert werden die Daten in das von Sun Microsystems entwickelte Format Portable Pixmap (PPM). Erst im linearen PPM Format werden die Bilddaten an die Auswertungssoftware übergeben.

5.5 Auswertungssoftware

Um den folgenden Abschnitt übersichtlich zu gestalten, werden verschiedene Fonts zur Kennzeichnung benutzt. **Funktionen** und **Unterfunktionen** sind halbfett markiert. Die *Bezeichnung der Datenstruktur* ist kursiv gedruckt.

Für die Auswertung der entstandenen Bilddaten sind zwei spezielle Funktionen mit MATLAB entwickelt worden.

Mit der Funktion **GetImageInformation** wird ein Originalbildpaar in Teilbilder für die Untersuchung der einzelnen Messfelder zerlegt. Jedes Teilbild wird mit dem in 4.3 beschriebenen Algorithmus zur Ermittlung der beleuchtenden Lichtfarbe separat ausgewertet. Im Anschluss werden die ermittelten Informationen an die Funktion **AnalyseImageInformation** übergeben und weiter verarbeitet. Ziel ist, durch die Gegenüberstellung der verschiedenen Testflächen eines Bildes Erkenntnisse über die Funktionalität des neuen Verfahrens an verschiedenen Oberflächenstrukturen zu gewinnen. Unterstützt wird dies über die Visualisierung der Versuchsergebnisse anhand von Grafiken und Histogrammen.

Die gewonnenen Informationen aus beiden Funktionen werden in je einer konzipierten Datenstruktur gesammelt und als ein Datensatz (.mat Datei) gespeichert. So können später anknüpfende Untersuchungen die erzeugten Datensätze weiter verwenden, ohne wieder die Meßflächen auswählen zu müssen. Insbesondere sind die Messfeldausschnitte beider Originalbilddaten enthalten, so dass die verschiedenen Meßfelder auch später immer wieder reproduzierbar ausgewertet werden können.

Im Aufbau der Hauptfunktion übernehmen Unterfunktionen Teilschritte der Gesamtanwendung.

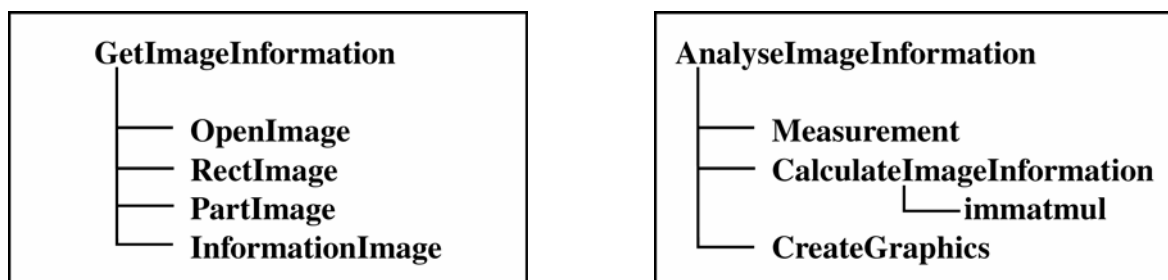


Abb. 40: **GetImageInformation** und **AnalyseImageInformation** mit zugehörigen Unterfunktionen

5.5.1 GetImageInformation

Die Funktion **GetImageInformation** beginnt mit der Auswahl des Bildpaares zur Differenzbildung. **Open Images** übernimmt das Öffnen der gewählten Bilder. Mit **RectImages** werden die Ausschnitte der Messfelder festgelegt. **PartImage** führt das Ausschneiden der Messfelder durch. In **InformationImage** findet die Hauptverarbeitung der Messfelder statt. Jedes Messfeld wird mit den folgenden in 4.3 beschriebenen Anwendungen verarbeitet:

- Maskierung der beiden unterschiedlich polarisierten Teilbilder zur Definition der gültigen und ungültigen Bildinhalte
- Subtraktion der Teilbilder zur Herstellung des Beleuchtungsbildes
- Maskierung des Beleuchtungsbildes zur Definition der gültigen und ungültigen Bildinhalte
- Bestimmung der Lichtfarbe
- Ausführen des Weißabgleichs

Die ermittelten Informationen werden in der Datenstruktur *mySaveData* gesammelt. Den Informationen wurden folgende Bezeichnungen zugeordnet (s. Abb. 41):

<i>ImFileName1 / ImFileName2</i>	Dateinamen des ausgewählten Bildpaares
<i>Parts</i>	Anzahl der Messfelder
<i>PartRect</i>	Koordinaten und Größe der Messfelder
<i>Info</i>	Ermittelte Informationen der Messfelder
<i>Partimage1 / Partimage2</i>	Teilbilder
<i>IllumImage</i>	Beleuchtungsbild (Differenzbild)
<i>IllumMask</i>	Maske zur Definition gültiger und ungültiger Pixel
<i>IllumValidImage</i>	Beleuchtungsbild mit gültigen Pixeln
<i>meanIllumValidImage</i>	Mittelwerte der Farbkanäle von <i>IllumValidImage</i>
<i>stdIllumValidImage</i>	Standardabweichung
<i>DensityIllumImage</i>	Logarithmiertes Dichtebild von <i>IllumValidImage</i>
<i>MeanDensityIllumImage</i>	Mittelwerte der Farbkanäle von <i>IllumValidImage</i>
<i>StdDensityIllumImage</i>	Standardabweichung
<i>ShowOrig</i>	Unkorrigiertes Messfeld
<i>ShowIllum</i>	Korrigiertes Messfeld

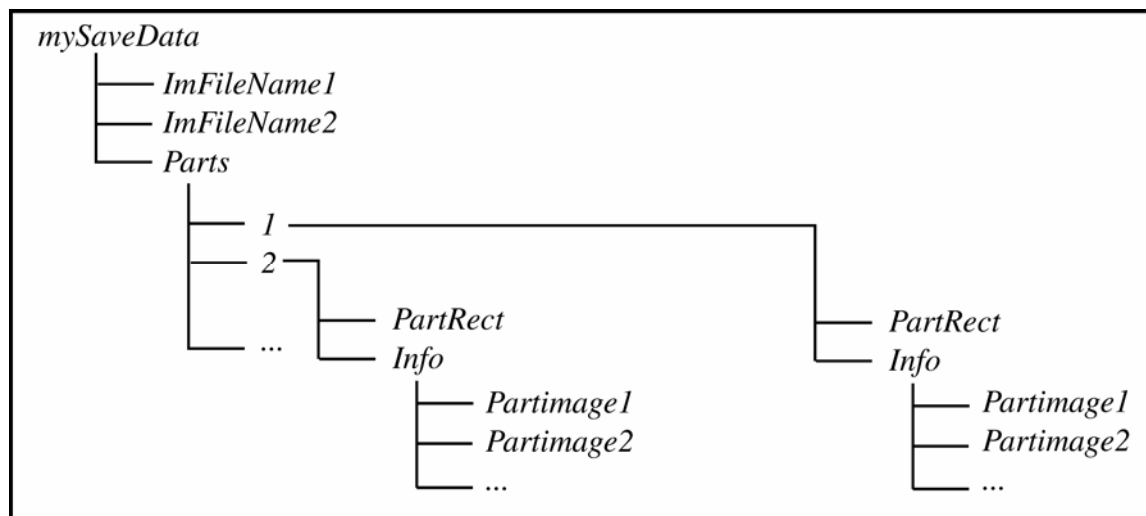


Abb. 41: Dateistruktur von mySaveData.mat

5.5.2 AnalyseImageInformation

Die Funktion **AnalyseImageInformation** übernimmt die in **GetImageInformation** entstandene MAT-Datei. Über das Aufrufen der Dateistruktur werden dieser Datei in der Weiterverarbeitung die erworbenen Informationen über die Teilbilder entnommen. Wie im folgenden Beispiel der Aufruf des ersten Teilbildes *PartImage1*:

```
myStruct.mySaveData.Parts(1,1).Info.PartImage1
```

Die Verarbeitung durch **AnalyseImageInformation** beginnt mit der Speicherplatzzuweisung in **Measurement**. Es folgen die Berechnungen zur Auswertung der Informationen aus **GetImageInformation**. Pro Messfeld werden folgende Operationen durchgeführt:

- Farbraumtransformation des Differenzdichtebildes von R, G, B nach L a b
- Berechnung des Signal-Rausch-Abstands vom Differenzbild
- Berechnung des Polarisationsgrades der Teilbilder
- Berechnung der gültigen Pixel pro Fläche
- Berechnung des Mittelungsgewinns

Mit **CreateGraphics** wird die grafische Darstellung der Auswertung umgesetzt. Die Versuchsergebnisse werden in sechs verschiedenen Grafiken visualisiert:

- Lichtfarben
- Signal-Rausch-Verhältnis
- Beleuchtungsdichten
- Polarisationsgrad
- Anteil an gültigen Pixeln
- Mittelungsgewinn

Die ermittelten Informationen werden in der Datenstruktur *mySaveAnalyseData* gesammelt. Den Informationen sind folgende Bezeichnungen zugeordnet:

<i>ImFileName1 / ImFileName2</i>	Dateinamen des ausgewählten Bildpaares
<i>Mean_L</i>	Mittelwert der L_Komponente vom Dichtebild
<i>Mean_a</i>	Mittelwert der a_Komponente vom Dichtebild
<i>Mean_b</i>	Mittelwert der b_Komponente vom Dichtebild
<i>meanGrayOrig_a</i>	Mittelwert der a_Komponente vom Referenzgrau
<i>meanGrayOrig_b</i>	Mittelwert der b_Komponente vom Referenzgrau
<i>SNR_Red</i>	SNR des roten Farbkanals von <i>IllumValidImage</i>
<i>SNR_Green</i>	SNR des grünen Farbkanals von <i>IllumValidImage</i>
<i>SNR_Blue</i>	SNR des blauen Farbkanals von <i>IllumValidImage</i>
<i>degreeOfPol</i>	Polarisationsgrad am Messfeld
<i>allPix</i>	Gesamtanzahl der Pixel des Messfeldes
<i>factorValidPix</i>	Anzahl der gültigen Pixel des Messfeldes
<i>sqrValidPix</i>	Standardabweichung der gültigen Pixel

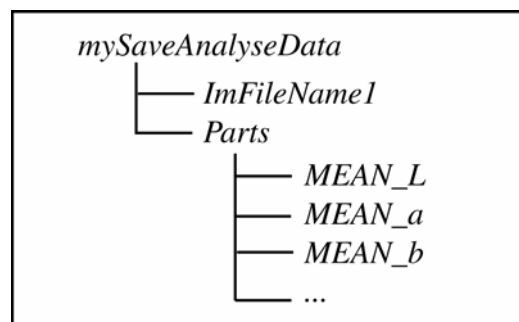


Abb. 42: Dateistruktur von *mySaveAnalyseData.mat*

5.5.2.1 Operationen und Grafiken der Auswertung

Farbraumtransformation der Lichtfarbwerte nach L a b

Die ermittelten Farbwerte der Lichtfarbe r_w , g_w , b_w werden in die helligkeitsinvariante und annähernd wahrnehmungsangepaßte Darstellung des Farbraumes Lab transformiert. Die Farbraumtransformation wird mit **immatmul** durchgeführt:

$$\begin{pmatrix} Mean_L \\ Mean_a \\ Mean_b \end{pmatrix} = myLabTrafoMatrix \cdot \begin{pmatrix} -\lg 10(r_w) \\ -\lg 10(g_w) \\ -\lg 10(b_w) \end{pmatrix}$$

mit

$$myLabTrafoMatrix = \begin{pmatrix} \left(\frac{1}{3}\right) & \left(\frac{1}{3}\right) & \left(\frac{1}{3}\right) \\ \left(\frac{1}{2}\right) & \left(-\frac{1}{2}\right) & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{2}\right) & \left(-\frac{1}{2}\right) \end{pmatrix}$$

Diagramm der Lichtfarben

Es wird ein Farbortdiagramm erstellt, in dem die ermittelten Lichtfarben von allen gemessenen Objektoberflächen eines Bildmotivs zusammen dargestellt sind.

Auf der x-Achse ist die Farbortkoordinate b aufgetragen und auf der y-Achse entsprechend die Farbortkoordinate a. Die Informationen über die Werte der Koordinaten liefern $Mean_a$ und $Mean_b$. Jedes Histogramm erhält eine Markierung des Farbortes, der den Farbort der Graukarte im Originalbild repräsentiert. Diese Referenz dient als Prüfungskriterium für die Beurteilung der Wirksamkeit und Genauigkeit des neuen Verfahrens. Je näher der Farbort für die ermittelte Lichtfarbe am Referenzort liegt, desto erfolgreicher war die Anwendung. Idealerweise sammeln sich die ermittelten Werte wolkenförmig um den Referenzort. Die Farborte sind nummeriert, wobei die Ziffern die Reihenfolge der genommenen Messungen im Motiv darstellt. Bei der Untersuchung des Testcharts repräsentiert z.B. Ziffer 2 die Testfläche mit der Graukarte, Ziffer 4 die Testfläche mit dem Kork, usw. Die Zuordnung wird durch die Verwendung der gleichen Farbe bei Ziffer und zugehörigem Farbort ermöglicht.

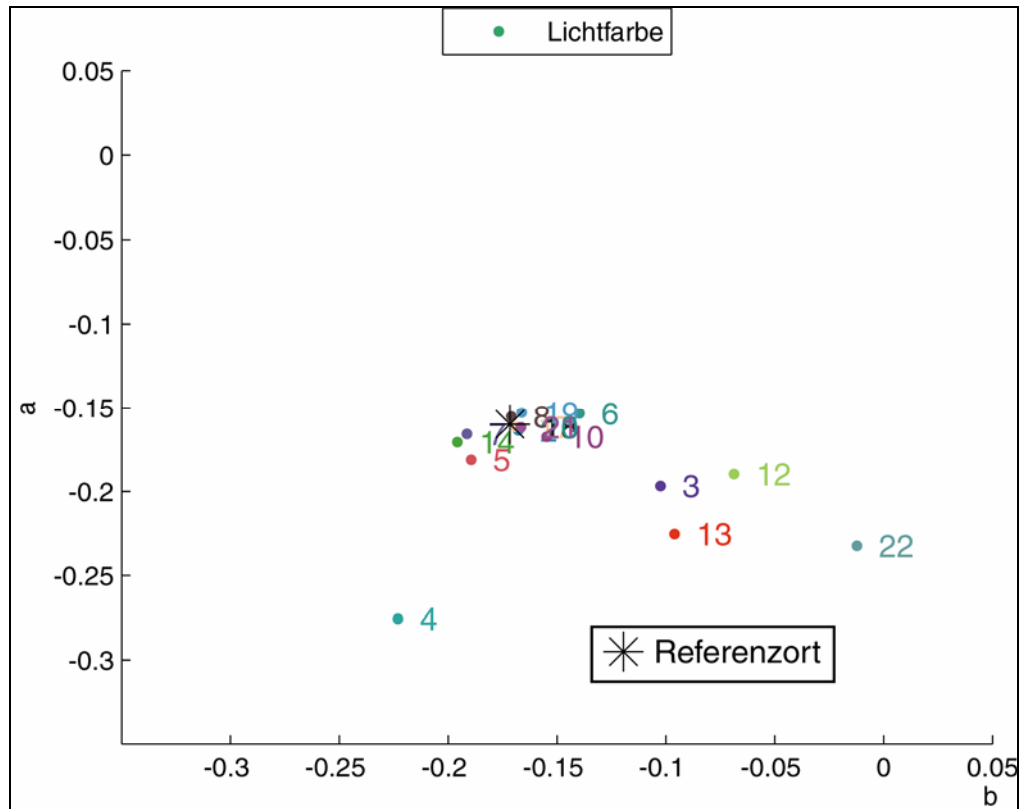


Abb. 43: Lichtfarbe

Grafik mit Beleuchtungsichten

Die Beleuchtungsichte ist hier ein Maß für die Aussteuerung des Differenzsignals (also des Beleuchtungsbildes) an der jeweiligen Testoberfläche. Dabei wird die Intensität über die Helligkeitskomponente L des transformierten Beleuchtungsbildes dargestellt. Auf der x-Achse befindet sich die Nummerierung der Messfelder. Die Werte auf der y-Achse entsprechen der Beleuchtungsichte, mit einem Wertebereich von 0 bis 3, wobei die Werte aus *Mean_L* entnommen werden. Diese Werte sind aus dem logarithmierten Dichtebild entstanden. Deshalb kennzeichnet der Wert 0 die stärkste Intensität. Wohingegen beim Wert 3 aufgrund künstlicher Begrenzung kein Nutzsignal mehr existiert.

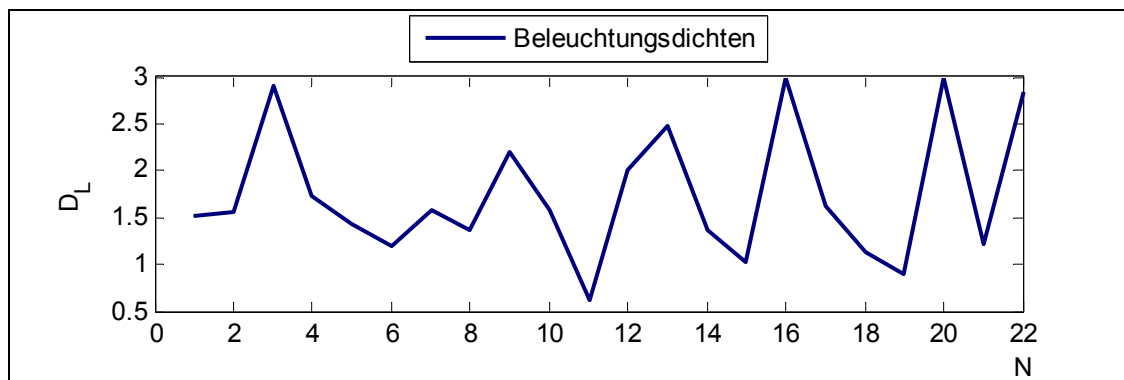


Abb. 44: Beleuchtungsichten

Berechnung des Signal-Rausch-Abstands vom Differenzbild

Der Signal-Rausch-Abstand (SNR) wird durch das Verhältnis der mittleren Leistung des Nutzsignals zur mittleren Rauschleistung des Störsignals dargestellt. In dieser Anwendung wird dies durch das Verhältnis von *meanIllumValidImage* zu *stdIllumValidImage* ausgedrückt:

$$SNR = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\text{meanIllumValidImage}}{\text{stdIllumValidImage}} \right)$$

Grafik des Signal-Rausch-Verhältnisses

Das Signal-Rausch-Verhältnis ist ein Maß für die Qualität des Differenzbildsignals. Das Signal-Rausch-Verhältnis wird in drei Grafiken für die Farbkanäle Rot, Grün und Blau dargestellt. Auf der x-Achse werden die Messfeldnummern aufgetragen. Die y-Achse trägt die Werte des ermittelten Rauschverhältnisses. Daher ist die Dimensionierung in [dB]. Der Wertebereich der y-Achse reicht von -20 bis +40 dB. Die Werte für die entsprechenden Farbkanäle werden aus *SNR_R*, *SNR_G* und *SNR_B* entnommen.

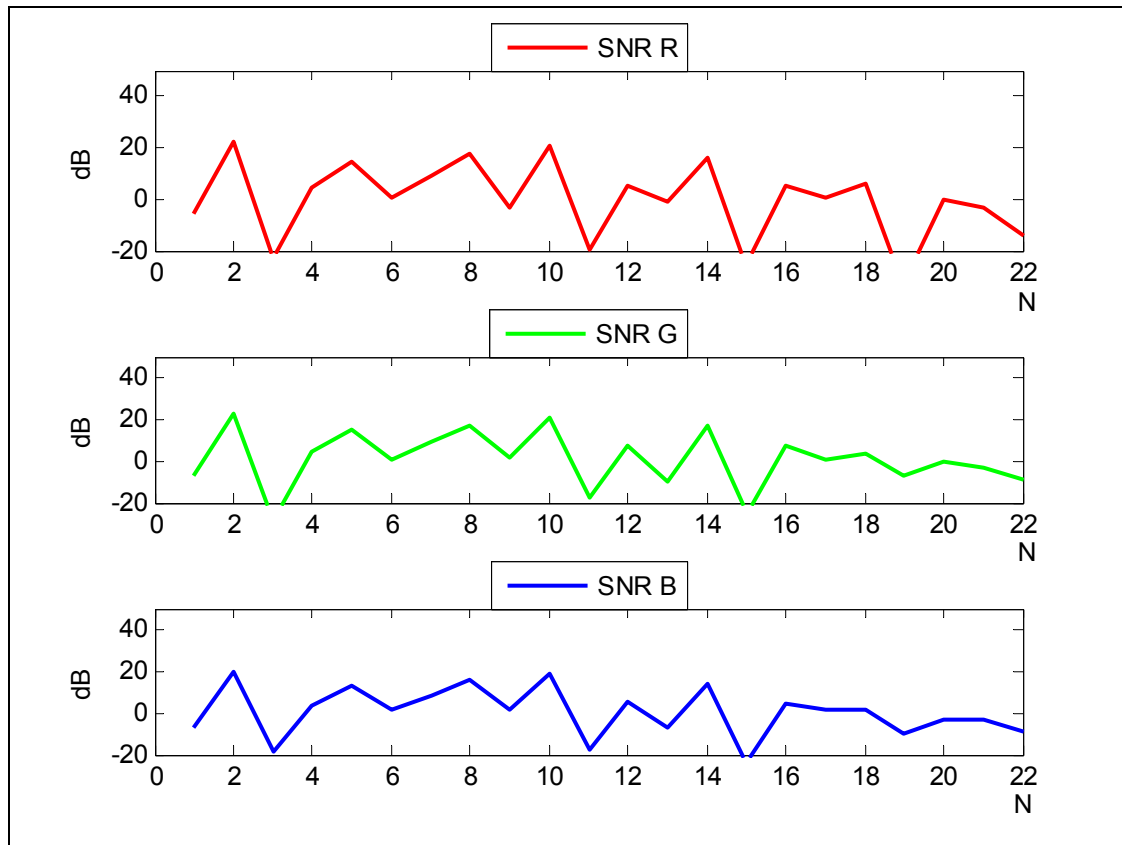


Abb. 45: Signal-Rausch-Verhältnis der Farbkanäle R, G, B

Berechnung des Polarisationsgrads der Teilbilder

Zur Berechnung des Polarisationsgrades P werden die beiden Teilbilder *Partimage1* und *Partimage2* wie folgt verarbeitet:

$$myPolDegreeImage = \frac{Partimage1 - Partimage2}{Partimage1 + Partimage2}$$

Darstellung des Polarisationsgrades

Der Polarisationsgrad P des Differenzbildes ist ein Maß für das polarisierte Licht. Dazu wird das Differenzbild im Verhältnis zur Summe der beiden Teilbilder betrachtet:

$$P = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}.$$

I_1 entspricht dem Teilbild *Partimage1* und I_2 dem Teilbild *Partimage2*. Die betreffenden Bilder liegen in Form von pixelweisen RGB-Bildern vor. Für die Berechnung des Polarisationsgrades wird deshalb im Anschluss über die Farbkanäle und Pixel gemittelt:

$$\bar{P}_R = \frac{\sum (myPolDegreeImage)_R}{Anzahl\ der\ Pixel}$$

$$\bar{P}_G = \frac{\sum (myPolDegreeImage)_G}{Anzahl\ der\ Pixel}$$

$$\bar{P}_B = \frac{\sum (myPolDegreeImage)_B}{Anzahl\ der\ Pixel}$$

$$degreeOfPol = \frac{\bar{P}_R + \bar{P}_G + \bar{P}_B}{3}$$

Dann erst ergibt die Berechnung des Polarisationsgrades einen Zahlenwert. Wie schon bei den vorangegangenen Grafiken entspricht die Bezeichnung der x-Achse den nummerierten Messfeldern. Auf der y-Achse sind die Werte des Polarisationsgrades P aufgetragen. Diese Werte werden aus *degreeOfPix* generiert.

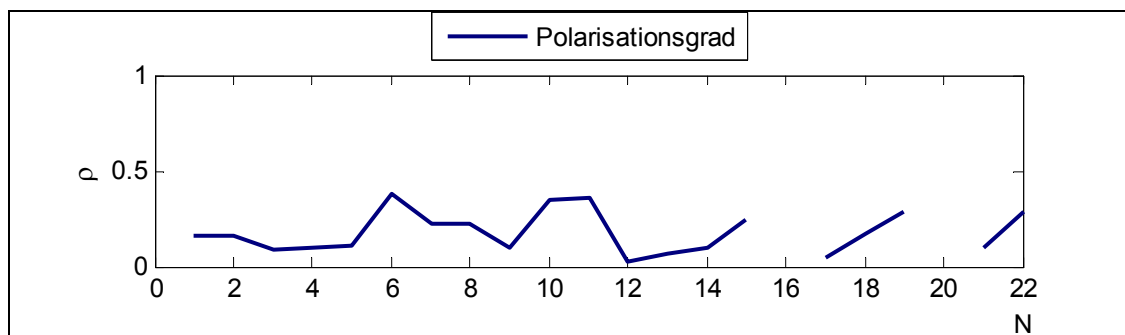


Abb. 46: Polarisationsgrad

Berechnung der gültigen Bildinhalte

Die Anzahl der gültigen Pixel wird durch das Aufsummieren der Maske *IllumMask* bestimmt:

$$validPix = \text{sum}(\text{sum}(myIllumMask))$$

Zur Bestimmung der Gesamtanzahl von Pixeln werden die Werte der Maske *IllumMask* addiert und im Anschluss mit der Negation aufsummiert:

$$allPix = \text{sum}(\text{sum}(myIllumMask)) + \text{sum}(\text{sum}(\sim myIllumMask))$$

Daraus wird das Verhältnis von gültigen Pixeln zur Gesamtanzahl der Pixel eines Teilbildes gebildet:

$$\text{factorValidPix} = \frac{\text{validPix}}{\text{allPix}}$$

Außerdem wird der Genauigkeitsgewinn durch Mittelwertbildung über die Anzahl der gültigen Pixel ermittelt ($\sigma \sim \frac{1}{\sqrt{N}}$):

$$\text{sqrtValidPix} = \text{sqrt}(\text{sum}(\text{sum}(\text{myIllumMask})))$$

Für die Angabe des hier bezeichneten Mittelungsgewinns in [dB] werden diese Werte gewandelt in:

$$20 * \log_{10}(\text{sqrtValidPix})$$

Grafik mit Anteil an gültigen Pixeln

Der Anteil an gültigen Pixeln beschreibt ein relatives Flächenmaß. Er sagt aus, wie der Flächenanteil an gültigen Pixel im Verhältnis zur Gesamtfläche steht. Über dieses Maß kann die auswertbare Reflexionseigenschaft einer Körperoberfläche beurteilt werden.

Die x-Achse stellt wiederum die Nummerierung der Testflächen dar. Auf der y-Achse finden sich die Werte aus *factorValidPix* wieder. Der Wertebereich wird in [%] angegeben.

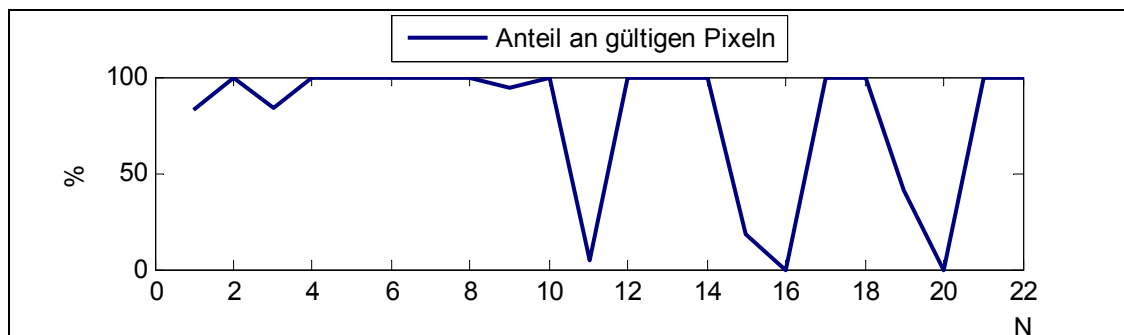


Abb. 47: Anteil an gültigen Pixeln

$$\text{factorValidPix} = \frac{\text{validPix}}{\text{allPix}}$$

Grafik mit Mittelungsgewinn

Mit dieser Grafik wird die Anzahl der beteiligten gültigen Pixel bei der Messung einer Testfläche beschrieben. Diese Beschreibung dient als Maß für die Verlässlichkeit. Je mehr gültige Pixel an der Messung beteiligt waren, desto verlässlicher sind die Messergebnisse.

Die Darstellung ermöglicht eine Aussage über die Qualität der Auswertung einer Körperoberfläche.

Auf der x-Achse sind die Messfelder dargestellt. Die y-Achse trägt die Werte des Mittelungsgewinns. Diese Werte werden aus *sqrtValidPix* generiert.

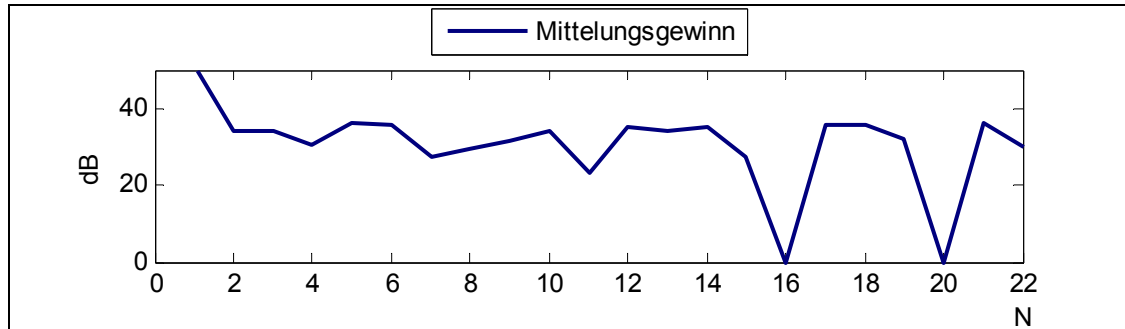


Abb. 48: Mittelungsgewinn

$$20 * \log_{10} (\text{sqrtValidPix})$$

6 Auswertung der Versuchsergebnisse

Die Auswertung erfolgt durch die Beurteilung der grafisch dargestellten Versuchsergebnisse. Es werden Bildpaare heraus gegriffen, die für die jeweilige Betrachtung repräsentativ sind. Für die Darstellung der betrachteten Situation, werden nur einige Testflächen ausgewählt, die stellvertretend für andere der gleichen Klassifizierung stehen. Vorab ist eine Beurteilung der Aussagekraft einer Messung notwendig.

6.1 Aussagekraft der Messwerte

In der grafischen Darstellung sind verschiedene Messfelder nebeneinander angeordnet. Es ist zu beachten, dass nicht immer alle Messfelder gleichzeitig für die Erklärung einer Betrachtung herangezogen werden können. Orientiert sich die Aussteuerung der Aufzeichnung beispielsweise an der Messung der Graukarte oder an dunklen Objekten, sind direkte Reflexe in den Bildern übersteuert. In diesem Fall sind die Messergebnisse an glatten Oberflächen als wertlos zu betrachten.

Durch die Differenzbildung zur Herstellung des Beleuchtungsbildes, ist das Vorhandensein von übersteuerten Pixeln im Nutzsignal ausgeschlossen. Dagegen kann jedoch ein sehr niedrig ausgesteuertes Nutzsignal entstehen.

Ein untersteuertes Nutzsignal lässt sich in den Grafiken anhand von drei Kriterien ausfindig machen:

- SNR-Wert der Kanäle ist relativ niedrig im Bereich von 0 dB
- Beleuchtungsichte-Wert liegt relativ hoch im Bereich von 3
- Anteil an gültigen Pixeln ist relativ niedrig im Bereich von 0-10 %

Im Bereich von Untersteuerung überlagert sich das Nutzsignal zu annähernd gleichen Anteilen mit dem Rauschsignal. Dies führt zu niedrigen SNR-Werten. Ein niedrig ausgesteuertes Nutzsignal spricht für ein relativ dunkel beleuchtetes Messfeld oder einen geringen Polarisationsgrad. Daher ist der Wert der Beleuchtungsichte hoch. Im untersteuerten Bereich erwartet man außerdem eine erhöhte Anzahl von ungültigen Pixeln. Sind diese drei Kriterien gleichzeitig erfüllt, kann man mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass an dieser Stelle eine Fehlmessung gemacht wurde. Das betroffene Messfeld sollte dann nicht ausgewertet werden.

6.2 Genauigkeitsanforderungen an den Farbort der Lichtfarbe

Die Farborte der ermittelten Lichtfarbe werden im Farbortdiagramm dargestellt. Wie genau eine Messung erfolgt ist, kann durch den Abstand des Farbortes zum Referenzort beurteilt werden. Dieser Ort stellt, wie in 0 erläutert, die Lichtfarbe der dominanten Beleuchtung dar. Idealerweise sammeln sich die Farborte der einzelnen Testoberflächen wolkenförmig in der nahen Umgebung des Referenzortes. Denn je näher der Farbort am Referenzort liegt, umso genauer ist die Messung der dominanten Lichtquelle erfolgt.

Die Bewertung der Genauigkeit erfolgt hier über die visuelle Wahrnehmung einer Farbveränderung. Dazu wird ein Bild ausgewählt, dessen Farbkanäle am Weißpunkt ausbalanciert sind. Im Farbortdiagramm liegt die Graukarte am Ort (0,0). Das neutrale Bild wird ausgehend von diesem Ort, entlang der a- oder b-Achse schrittweise farbverändert, sowohl in positive als auch in negative Richtung.

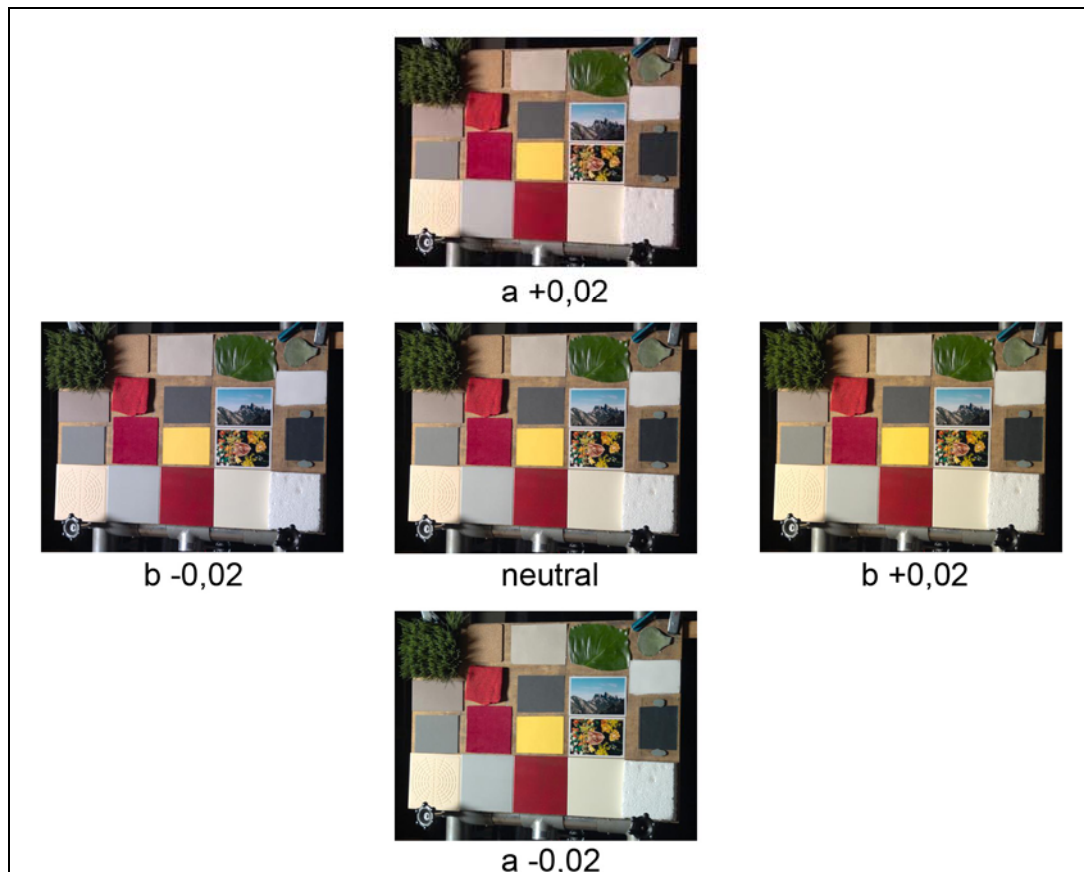


Abb. 49: Farbveränderung in 0,02er Schritten

Wie stark sich die Farbveränderung auswirkt, ist in Abb. 49 in Schritten von 0.02 Einheiten dargestellt. Die Stärke der Veränderung lässt sich auf den Abstand der ermittelten Farborten zum Referenzort übertragen. Ein treffsicherer Weißpunkt sollte in einem Bereich von ± 0.025 um den Referenzpunkt herum liegen.

6.3 Einfluss des Einfallswinkels

Ein Funktionskriterium des Verfahrens ist der Polarisationsgrad des reflektierten Lichtanteils. Der Polarisationsgrad ist abhängig vom Einfallswinkel und dem Brechungsindex der Körperoberfläche. Im Versuch wird an dieser Stelle nur mit einem Testchart gearbeitet. Deshalb ist der Brechungsindex der untersuchten Körperoberflächen statisch, wohingegen der Einfallswinkel variabel ist. Laut Theorie verschwindet der Polarisationsgrad, wenn die Betrachtungsrichtung der Kamera gleich der Richtung des einfallenden Lichtes ist. Maximal ist der Polarisationsgrad, wenn der Einfallswinkel im Bereich des Brewsterwinkels liegt. Der Brewsterwinkel der verwendeten Testoberflächen ist unbekannt.

In der Untersuchung soll gezeigt werden, ob eine Veränderung des Einfallswinkels die theoretischen Betrachtungen zur Beeinflussung des Polarisationsgrades bestätigen. Außerdem wird untersucht, ab welchem Polarisationsgrad in Bezug auf die Ermittlung der Lichtfarbe aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden. Ebenso interessant ist, inwiefern der Brewsterwinkel lokalisiert werden kann. Er wird im Bereich von Position 4-5 erwartet.

Beim Versuchsaufbau werden die verschiedenen Einfallswinkel durch die Veränderung der Standorte von Licht und Kamera an den Positionen 1-5 umgesetzt. An Position 1 ist der Einfallswinkel etwa bei 0° , d. h. Licht und Kamera befinden sich nahezu an der gleichen Stelle. An den folgenden Positionen wird der Einfallswinkel des Lichtes der Reihe nach um jeweils $18,47^\circ$ vergrößert. Der Betrachtungswinkel der Kamera vergrößert sich ebenfalls um $18,47^\circ$, jedoch in entgegengesetzter Richtung. Für die Darstellung der Versuchsergebnisse werden die Grafiken folgender Bildpaare gewählt:

Position 1, N-1, 3696_3698, (s. S. 105-106)

Position 2, N-1, 3724_3726, (s. S. 107-108)

Position 3, N-1, 3751_3753, (s. S. 109-110)

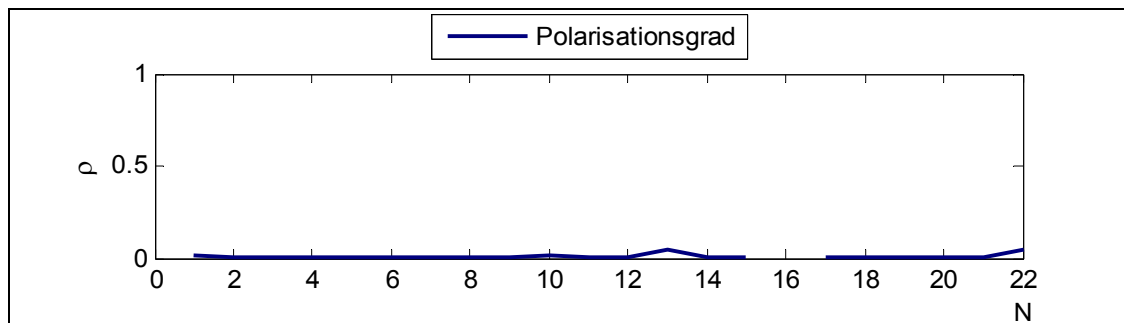
Position 4, N-1, 3773_3775, (s. S. 111-112)

Position 5, N-1, 3789_3791, (s. S. 113-114)

Die gewählten Bildpaare sind mit der Aussteuerung N-1 erstellt worden. Direkte Reflexe sind dadurch übersteuert. Deshalb ist die Aussagekraft der Messfelder mit glatten Oberflächen im Bezug auf die Ermittlung der Lichtfarbe kritisch zu betrachten. Dazu zählen die Messfelder (6), (11), (15), (16), (19), (20). Das Nutzsignal von Messfeld (3) ist

untersteuert und wird in dieser Betrachtung ebenfalls nicht berücksichtigt.

Betrachtet man die Grafiken der Reihe nach, von Position 1 bis 5, kann im Verlauf mit wachsenden Einfallswinkeln eine deutliche Steigerung des Polarisationsgrades beobachtet werden. An Position 1 (S.105-106) ist er wie erwartet nicht messbar. Diese Beobachtung entspricht der Theorie, dass bei einem Winkel von 0° zwischen Licht und Kamera der Polarisationsgrad verschwindet.



Grafik 1: 3696_3698; Minimaler Polarisationsgrad

Die folgenden Histogramme stellen die ermittelten Farborte der grauen Pappe (5) dar. Man kann gut erkennen, dass die Farborte bei niedrigem Polarisationsgrad weit verteilt sind.

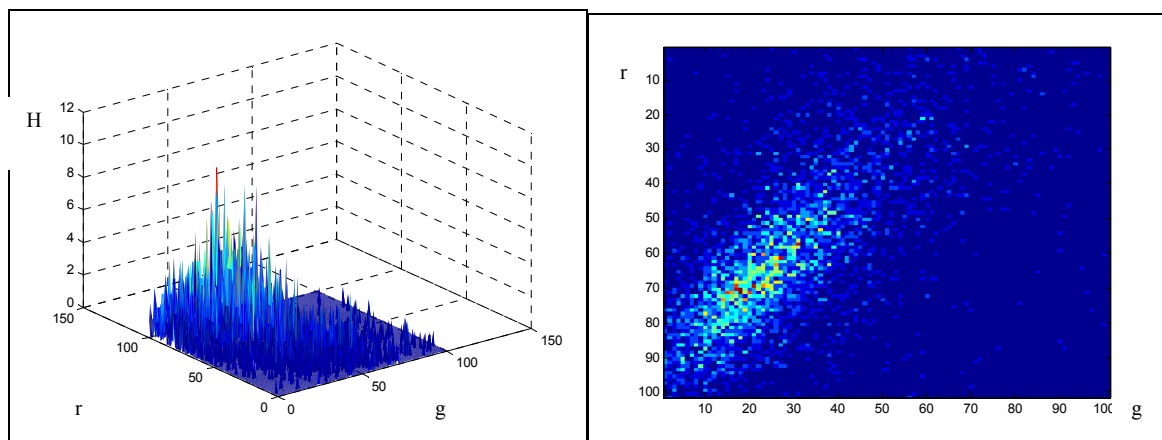
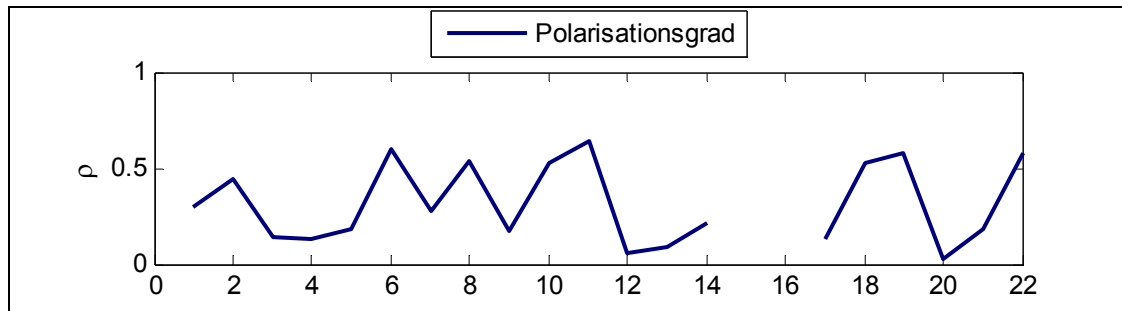


Abb. 50: 3696_3698; Histogramme der grauen Pappe an Position 1

Ein schwaches Nutzsignal entsteht nur an den Messfeldern (10) und (13). Die dafür verantwortlichen Effekte werden später erläutert. Ab Position 2 (S. 107-108) erzielt der Polarisationsgrad messbare Werte, die bis Position 4 (S.111-112) kontinuierlich ansteigen. Hier ist die Wachstumsgrenze erreicht. Die Werte an Position 5 (S. 113-114) nehmen wieder ab. Daraus lässt sich ableiten, dass der Brewsterwinkel im Bereich von Position 4 liegt. Im Versuchsaufbau entspricht der Einfallswinkel in diesem Fall $55,29^\circ$.

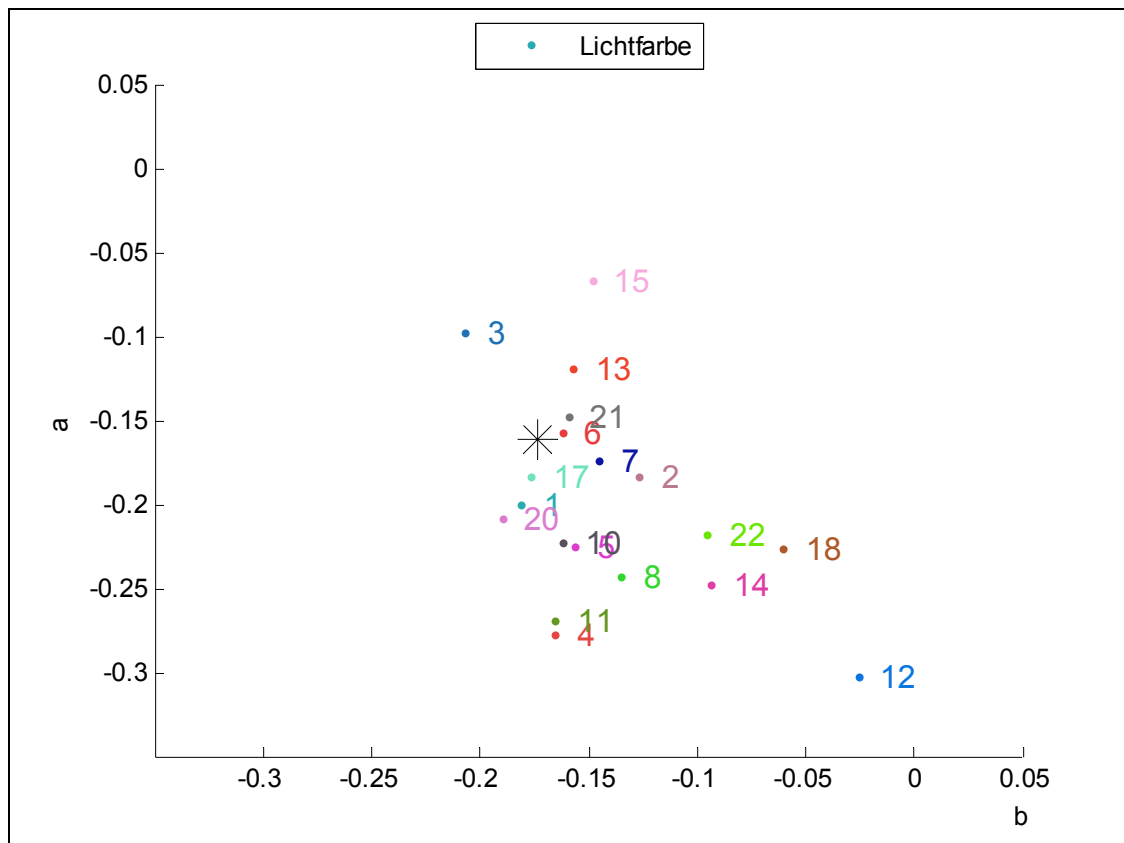


Grafik 2: 3773_3775; Maximaler Polarisationsgrad

Außerdem beobachtet man bei der Vergrößerung des Einfallswinkels einen Zuwachs des Signalrauschabstandes. Diese Erscheinung unterstützt die Feststellung über die Steigerung des Polarisationsgrades. Denn ein steigender Polarisationsgrad vergrößert das Nutzsignal, wodurch sich der Abstand zum Störsignal erweitert.

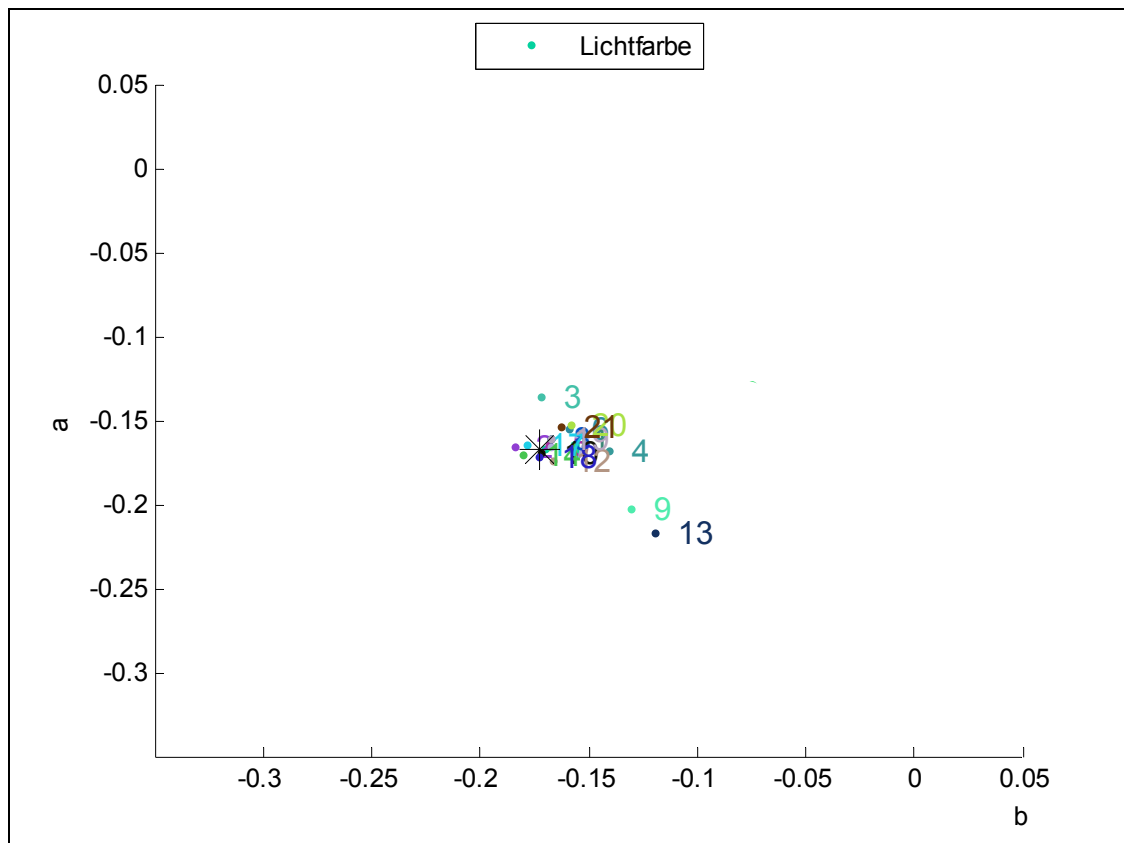
Die Veränderung der Einfallswinkel ist auch bei der Ermittlung der Lichtfarbe erkennbar. Bei kleinem Einfallswinkel liegen die ermittelten Farborte der Messfelder weit um den Referenzort verstreut. Erst durch die Zunahme des Einfallswinkels konzentrieren sich die Farborte der ermittelten Lichtfarbe um den Referenzort herum. Mit steigendem Polarisationsgrad wandern die Farborte deutlich Richtung Referenzort.

An Position 1 ist kein Polarisationsgrad vorhanden, so dass auch keine aussagekräftigen Farborte bei der Ermittlung der Lichtfarbe gefunden werden:



Grafik 3: 3696_3698; Gestreute Anordnung der Farborte bei Position 1

Das Nutzsignal an Position 2 (s. Beleuchtungsichten in Grafik 31) ist relativ gering. Erstaunlich ist, dass einige Flächen trotzdem schon nah am Referenzort erscheinen. Betroffen sind die Messfelder (4), (5), (6), (7), (8), (10) und (11). Dabei handelt es sich hier, mit Ausnahme von (6) und (11), um matte Körperoberflächen. Glatte Oberflächen würden vermutlich das gleiche Verhalten zeigen, wenn sie nicht übersteuert wären. Aber auch die restlichen Testflächen haben sich schon deutlich Richtung Referenzort bewegt. Hinsichtlich der Lichtfarbe ergeben sich die zuverlässigsten Ergebnisse unter den Einfallswinkeln der Positionen 3, 4 und 5. Dort konzentrieren sich die Farborte wolkenförmig um den Referenzort herum:



Grafik 4: 3789_3791; Wolkenförmige Anordnung der Farbpunkte bei Position 5

Insgesamt lässt sich bei dieser Betrachtung eine Zunahme des Polarisationsgrades mit Steigerung des Einfallswinkels feststellen.

Es gilt:

- kleiner Einfallswinkel = niedriger Polarisationsgrad = falsche Lichtfarbe
- wachsender Einfallswinkel = steigender Polarisationsgrad = Lichtfarbe wandert Richtung Referenzort
- Einfallswinkel $55,29^\circ$ = maximaler Polarisationsgrad = Lichtfarbe konzentriert sich am Referenzort

Der Brewsterwinkel liegt im Bereich von Position 4 ($55,29^\circ$). An den verschiedenen Positionen bleibt das Muster des Polarisationsgrades zwischen den Testflächen relativ konstant. Dies lässt auf ein ähnliches Polarisationsverhalten der verschiedenen Oberflächen schließen. Die stärksten Polarisationsgrade erreicht man bei der Messung an glatten und dunklen matten Oberflächen. Dagegen erreichen die verwinkelten Oberflächen die niedrigsten Polarisationsgrade.

6.4 Einfluss des Verschwenkwinkels

Die folgende Überlegung stützt sich auf das in 4.4.1 erläuterte Spiegelmodell von matten Oberflächen dreidimensionaler Objekte. Demnach ändern sich bei verschiedenen Orientierungen eines Objektes die Ausrichtungen der marginalen Spiegel an der Oberfläche. Die Folge ist, dass sich die Reflexionsrichtung jedes Spiegels verändert. Da es sich aber um eine Vielzahl von willkürlich angeordneten Spiegelchen handelt, ist es wahrscheinlich, dass alle Reflexionsrichtungen trotzdem erhalten bleiben. Die Beobachtung der polarisierten Reflexion bleibt bei Veränderung der Objektorientierung unbeeinflusst. Dies führt zu der Annahme, dass der Polarisationsgrad der reflektierten (nicht der remittierten!) Lichtanteile unabhängig von der Ausrichtung einer Körperoberfläche ist. Allerdings führt die Verschwenkung der Objektebene gleichzeitig zu einer Veränderung des Verhältnisses des reflektierten zum remittierten Lichtanteil, weil sich die räumlichen Lichtverteilungen dieser Lichtanteile aufgrund ihrer unterschiedlichen Richtwirkung (Reflexion ist deutlich gerichteter als Remission) unterscheiden. Weil der Anteil des Remissionsanteils gegenüber dem Reflexionsanteil mit zunehmender Verschwenkung ansteigt, ist eine Abnahme des Polarisationsgrads zu erwarten. Allerdings gilt diese Überlegung nur für Oberflächen mit deutlichem Remissionsanteil. Bei sehr dunklen matten Oberflächen kann der Remissionsanteil gegenüber dem Reflexionsanteil vernachlässigt werden, und der Polarisationsgrad sollte relativ unabhängig von der Verschwenkung der Objektebene werden.

Mit diesem Versuch wird die Gültigkeit obiger Überlegung basierend auf dem Spiegelmodell überprüft. Für die Bestätigung wird ein fallender Polarisationsgrad bei verschwenkter Objektoberfläche erwartet.

Im Versuch wird die Ausrichtung der Spiegel durch das mehrfache Schwenken der Objektebene verändert. Der Standort von Licht und Kamera bleibt dabei fest. Die Verschwenkung wird von der Lichtquelle weg, hin zur Kamera durchgeführt. Durch das Schwenken wird die Fläche dunkler beleuchtet. Verursacht wird diese Abschwächung durch eine schlechtere Ausleuchtung mit der Lichtquelle. Außerdem nimmt die Beleuchtungsstärke bei schrägem Einfallswinkel ab.

Untersucht wird die Situation an Position 3. Es werden folgende Bilder betrachtet:

Variante 1: Position 3, N-1, 3751_3753, Einfallswinkel = Ausfallswinkel, (s. S. 109-110)

Variante 2: Position 3, N-1, 3757_3759, Schwenk senkrecht auf Standort 6, (s. S. 115-116)

Variante 3: Position 3, N-1, 3764_3766, Schwenk senkrecht auf Standort 7, (s. S. 117-118)

Variante 1 zeigt die Ausgangssituation unter Position 3. Die Objektebene ist dabei senkrecht zum Standort 5 ausgerichtet. In diesem Fall sieht die Kamera auf den glatten Objektoberflächen die Lichtquelle der Beleuchtung, da der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist. Die Reflexe an den glatten Testoberflächen (15), (16) und (20) sind übersteuert, da die Bilder mit der Aussteuerung N-1 erstellt wurden. Variante 2 zeigt Position 3 mit geschwenkter Objektebene senkrecht zu Standort 6. Und bei Variante 3 wird die Objektebene senkrecht zu Standort 7 ausgerichtet. Bei Variante 2 und 3 verschwinden direkte Reflexe von den glatten Oberflächen. Somit sind die glatten Testoberflächen (15), (16) und (20) hier nicht mehr übersteuert.

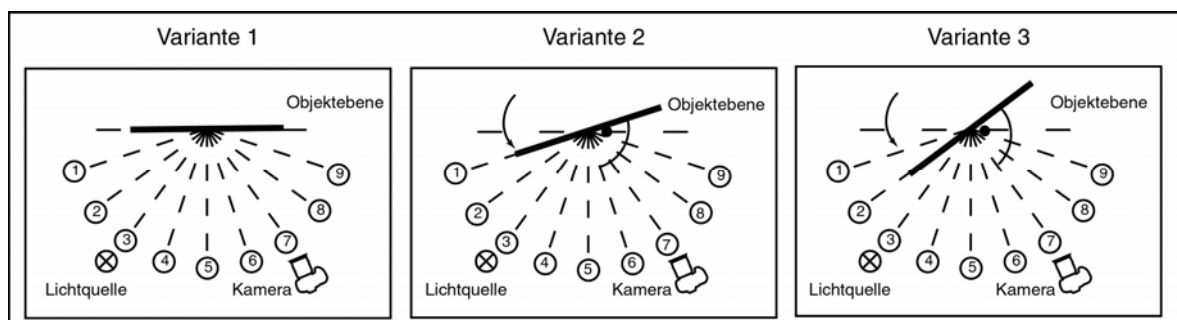
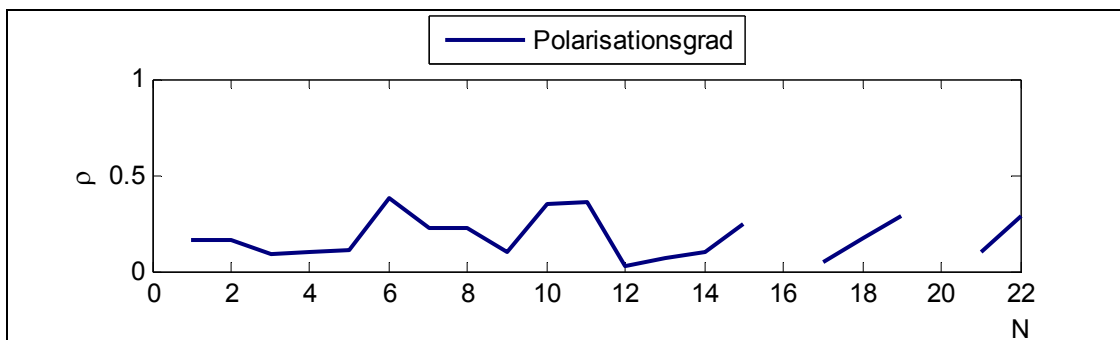


Abb. 51: Versuchsaufbau mit verschwenkter Objektebene

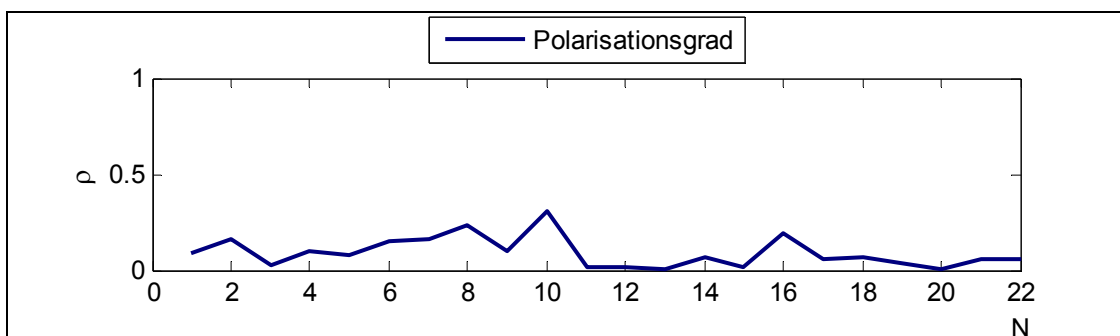
Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse wird die Vermutung über die Abhängigkeit des Polarisationsgrades von der Ausrichtung bestätigt. Im Vergleich stellt man fest, dass sich der Grad beim Schwenken unterschiedlich stark verringert:

- Bei glatten Oberflächen bricht der Polarisationsgrad beim Übergang von Variante 1 auf 2 abrupt ein.
- Bei matten hellen Oberflächen nimmt der Polarisationsgrad sukzessive ab.
- Bei matten dunklen Oberflächen bleibt der Polarisationsgrad nahezu konstant.

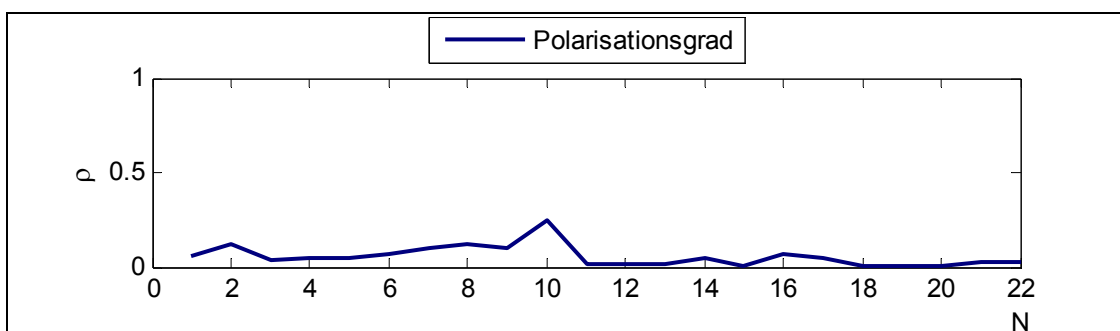
Dies ist gut am glatten Pflanzenblatt (6), an der schwarzen Pappe (10) und an der gelben Pappe (14) sichtbar.



Grafik 5: 3751_3753; Variante 1



Grafik 6: 3757_3759; Variante 2



Grafik 7: 3764_3766; Variante 3

Vergleicht man bei Variante 1 den Polarisationsgrad dieser drei Testflächen miteinander, ist festzustellen, dass das glatte Pflanzenblatt (6) den höchsten Wert erreicht. Dies erklärt sich durch die Messung des Reflexionsmaximums. Denn im Versuchsaufbau zeigen die glatten Oberflächen an dieser Position das Spiegelbild der dominanten Lichtquelle. Beim Verschwenken verschiebt sich das Reflexionsmaximum. Nun nimmt dieser Wert im Vergleich zu den matten Oberflächen stärker ab, da nicht mehr die dominante Lichtquelle reflektiert wird, sondern das Spiegelbild eines anderen Objektes im Raum.

Auffällig groß ist der Unterschied des Polarisationsgrades zwischen schwarzer Pappe (10) und gelber Pappe (14). Beides sind matten Oberflächen. Also ähneln sie sich stark in ihren Reflexionseigenschaften. Sie unterscheiden sich dagegen deutlich hinsichtlich der

Remissionseigenschaften. Der Remissionsanteil der gelben Pappe ist wesentlich höher, als bei der schwarzen Pappe. Die Erklärung der unterschiedlichen Werte findet man in der Definition des Polarisationsgrades. Sie beschreibt das Verhältnis der Intensität des polarisierten reflektierten Lichtanteils zur Gesamtintensität des remittierten und reflektierten Lichts. Dabei setzt sich der reflektierte Lichtanteil aus dem Anteil an polarisierten Reflexen und dem Remissionsanteil zusammen. Aufgrund des Remissionsanteils ist der Polarisationsgrad also auch stark durch den Remissionsgrad der Körperoberfläche beeinflusst. Eine weitere Beobachtung liefert der Vergleich zweier Situationen mit scheinbar gleichem Einfallswinkel. Die Ausrichtung der Spiegel bleibt gleich, verändert wird lediglich die Ausleuchtung der Flächen. Bei der ersten Situation misst die Kamera das Reflexionsmaximum³. In der zweiten Situation misst die Kamera den polarisierten Reflex aus der keulenförmigen Umgebung des Reflexionsmaximums, folglich aus einem deutlich spitzeren Ausfallswinkel. Den Reflex aus der keulenförmigen Umgebung übernimmt ein Spiegel aus der Nachbarschaft. Seine Ausrichtung erfüllt wiederum die Bedingung, dass der Einfallswinkel, vom neuen Betrachtungsort aus gesehen, gleich dem Ausfallswinkel ist.

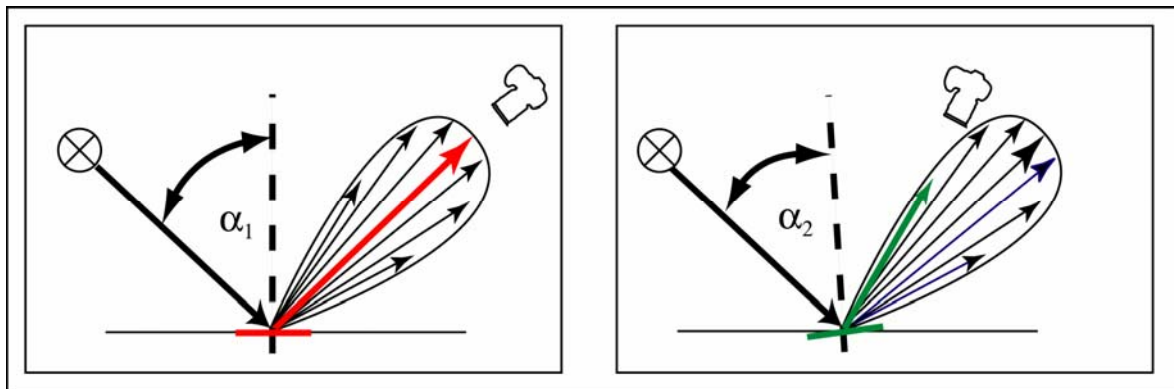


Abb. 52: Untersuchung des Spiegelmodells

Dazu werden folgende Versuchsaufbauten heraus gesucht:

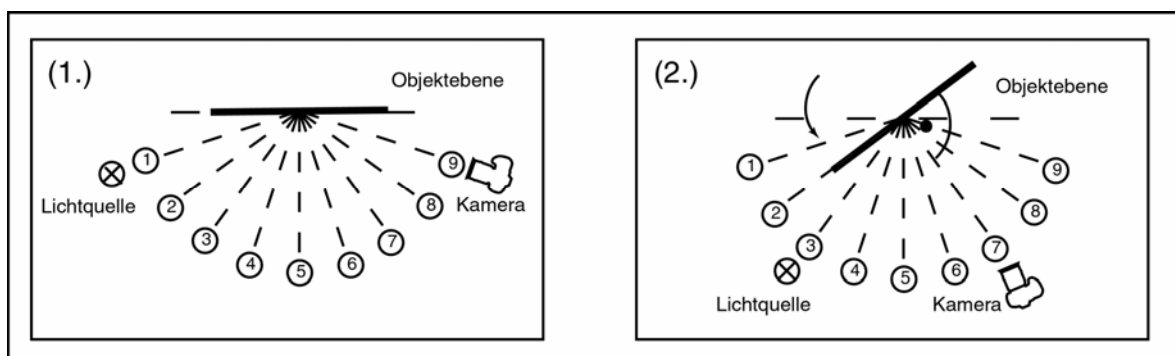
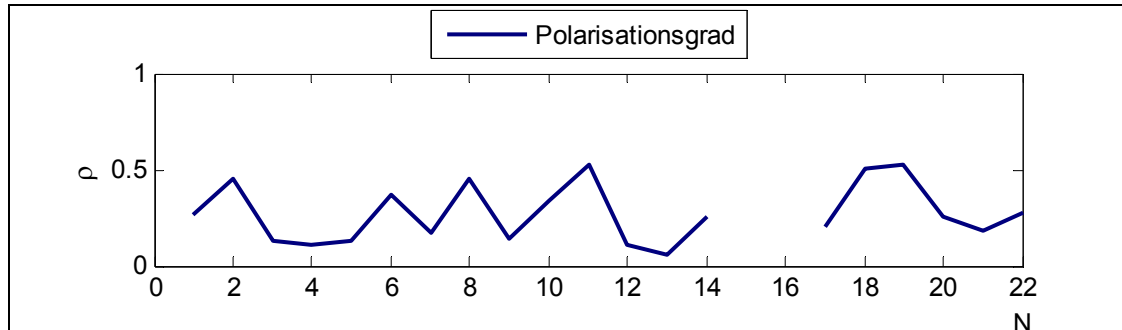


Abb. 53: Aufbau (1.) Einfallswinkel = Ausfallswinkel; Aufbau (2.) Einfallswinkel ≠ Ausfallswinkel

³ Einfallswinkel = Ausfallswinkel

Die Messung des Reflexionsmaximums (Grafik 8) ergibt am glatten Pflanzenblatt (6), an der schwarzen Pappe (10) und der gelben Pappe (14) einen größeren Polarisationsgrad als die polarisierten Reflexe aus der keulenförmigen Umgebung (Grafik 7).



Grafik 8: 3789_3791; Vergleich Variante 3

Der Versuch zeigt, dass die Polarisationsgrade zwischen Reflexionsmaximum und keulenförmiger Umgebung stark abfallen, was durch

- die unterschiedliche Lichtverteilung reflektierter und remittierter Strahlanteile und
- die verschiedenen Ein-/Ausfallswinkel der 2 Anordnungen

begründet ist. Lediglich die schwarze Pappe verhält sich in der Wirkung schwächer, weil der erste Grund durch die verschwindenden Remissionsanteile nicht zutrifft.

Auch diese Beobachtung lässt sich treffend durch das Spiegelmodell erklären.

6.5 Einfluss verschiedener Polarisationswinkel

Pro Motiv liegen drei unterschiedlich polarisierte Bilder vor. Die unterschiedlichen Polarisierungen werden durch die veränderbaren Absorptionseigenschaften des Polfilters erreicht. Im beschriebenen Versuch sind die Bilder unter den Filterstellungen 0° , 45° und 90° entstanden. Für das Verfahren wird eine Kombination aus zwei Bildern gewählt. In der Theorie liefert jede mögliche Kombination des Motivs ein Differenzbild, mit der gleichen Information über die beleuchtende Lichtfarbe. Dies zeigt sich durch die übereinstimmenden Verhältnisse in den Farbkanälen. Unter dieser Voraussetzung ist die Ermittlung der spektralen Zusammensetzung der Lichtfarbe bei allen Differenzbildern identisch. Die Differenzbilder unterscheiden sich lediglich in der Größe ihrer Nutzsignale. Im Versuch wird das maximale Nutzsignal bei dem senkrecht aufeinander stehenden Bildpaar $0^\circ/90^\circ$ erwartet.

Die folgende Betrachtung zeigt, welche Kombination an Bildpaaren in der Praxis das maximale Nutzsignal liefert. Demgegenüber steht der Fall eines zu geringen Nutzsignals, bei dem keine aussagekräftigen Ergebnisse über die Lichtfarbe ermittelt werden. Außerdem wird untersucht, wie stabil das Verfahren bei den Kombinationen an Bildpaaren die Bestimmung der Lichtfarbe durchführt. Dabei wird überprüft, ob das Verfahren bei allen Differenzbildern die gleiche Lichtfarbe ermittelt.

Betrachtet werden hier die Bildpaare der Position 4. Somit werden folgende Kombinationen bearbeitet:

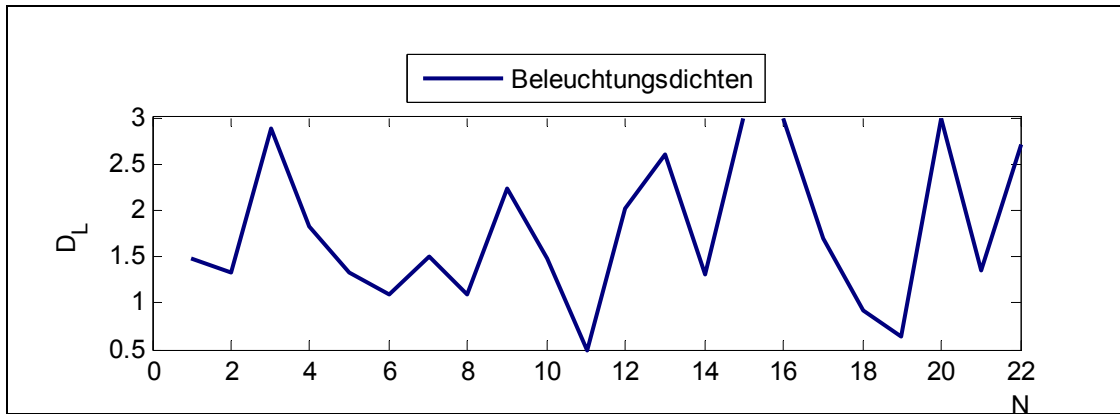
Position 4,	N-1,	3773_3774,	Kombination von 0° und 45°	(s. S. 119-120)
Position 4,	N-1,	3773_3775,	Kombination von 0° und 90°	(s. S. 121-122)
Position 4,	N-1,	3774_3775,	Kombination von 45° und 90°	(s. S. 123-124)

Wegen übersteuerten Signalen an den glatten Oberflächen fallen die Werte von glänzendem Photo (15), Glas (16) und Keramikkachel (20) aus dieser Untersuchung heraus.

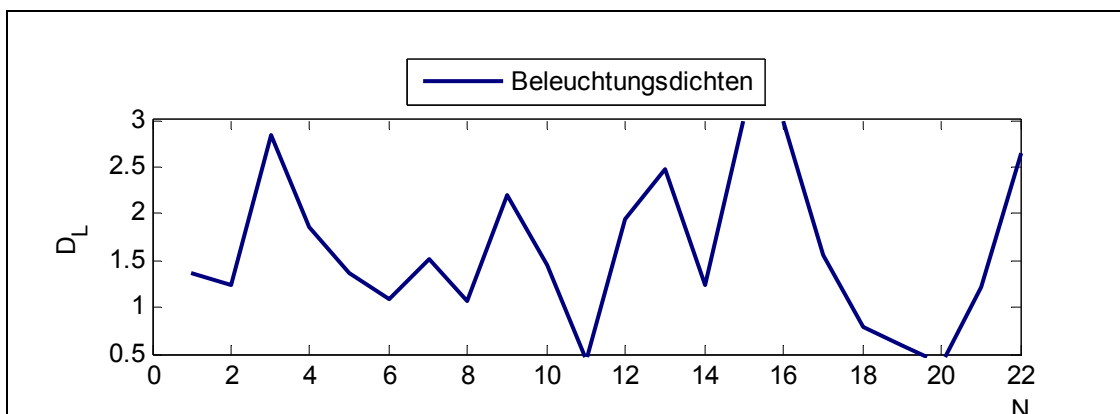
Betrachtet werden in den Grafiken der Bildpaare jeweils die Werte der Objektdichten, des Polarisationsgrades, des Anteil an gültigen Pixeln und die SNR-Werte. Entgegen der Erwartung ergeben sich die maximalen Werte nicht bei dem Bildpaar 3773_3775 mit der Kombination von 0° und 90° . Diese Kombination erreicht die gleichen Werte, wie das Bildpaar 3773_3774 mit der Kombination von 0° und 45° . Und zwar an allen Testflächen,

mit Ausnahme des übersteuerten Signals der Keramikachsel (20) bei 3773_3774. Dagegen erreicht das Bildpaar mit der Kombination von 45° und 90° in allen Grafiken deutlich schwächere Werte.

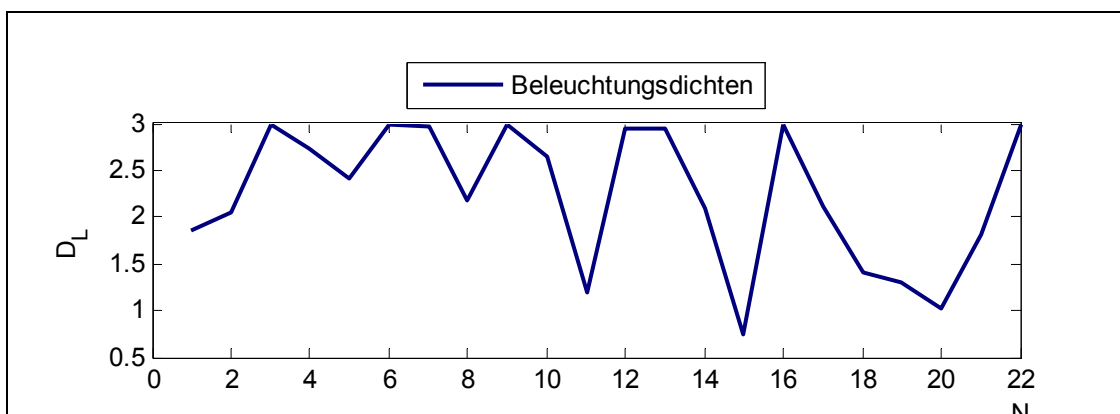
Diese Feststellungen werden hier durch die Gegenüberstellung der Grafiken mit den Beleuchtungsichten verdeutlicht.



Grafik 9: 3773_3774



Grafik 10: 3773_3775



Grafik 11: 3774_3775

Aus den Ergebnissen erschließen sich für den reflektierten Lichtanteil der Differenzbilder von 3773_3774 und 3773_3775 die gleichen Werte. Die Differenz von Filterstellung 0°

und 45° ist also gleich der Differenz von 0° und 90° . Daraus folgt, dass das Bild mit der Filterstellung 45° , den gleichen polarisierten Lichtanteil hat, wie das Bild mit der Filterstellung 90° . Dies widerspricht der angenommenen Transmissionsrichtung des Filters (vgl. 5.3.2). Die tatsächliche Transmissionsrichtung ist um ungefähr 22° verschoben.

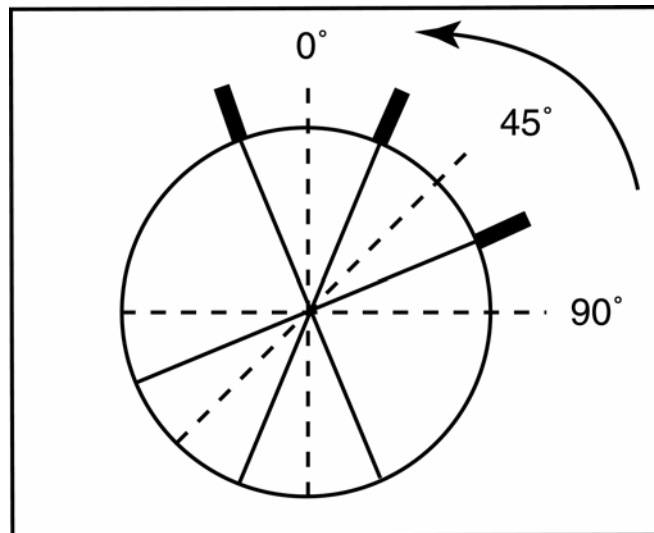
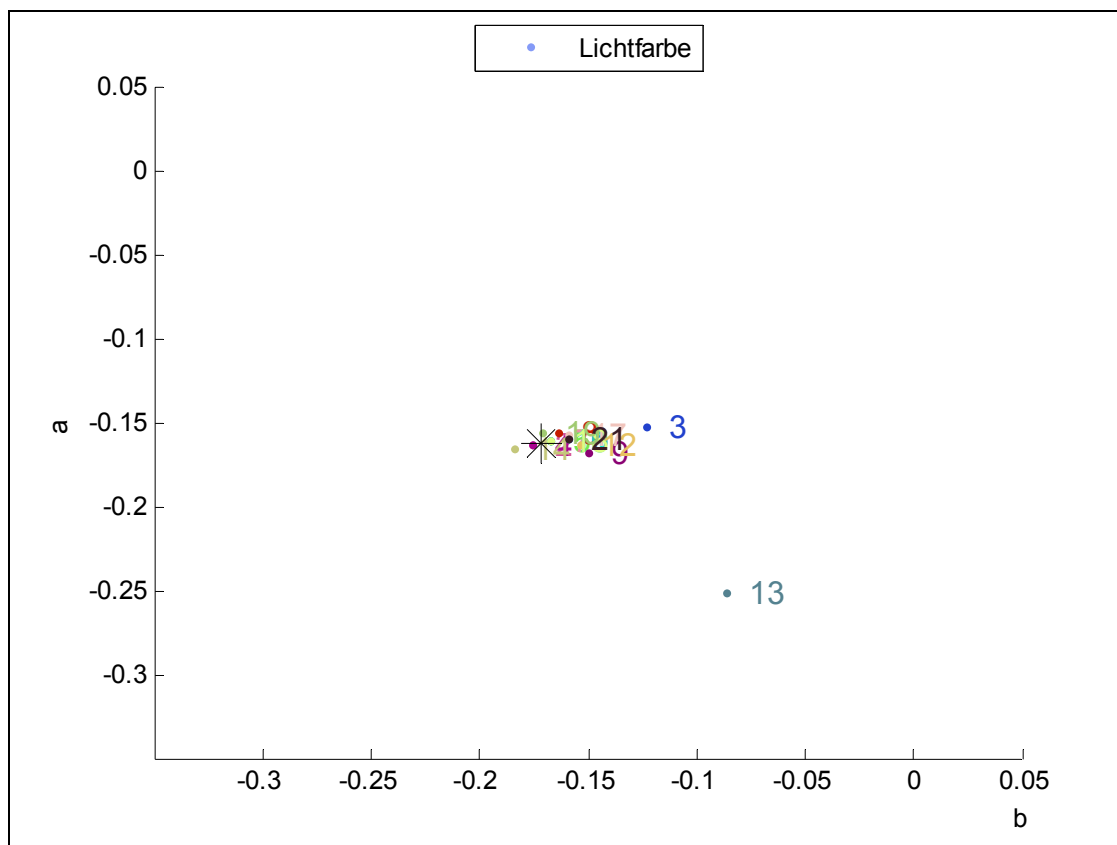


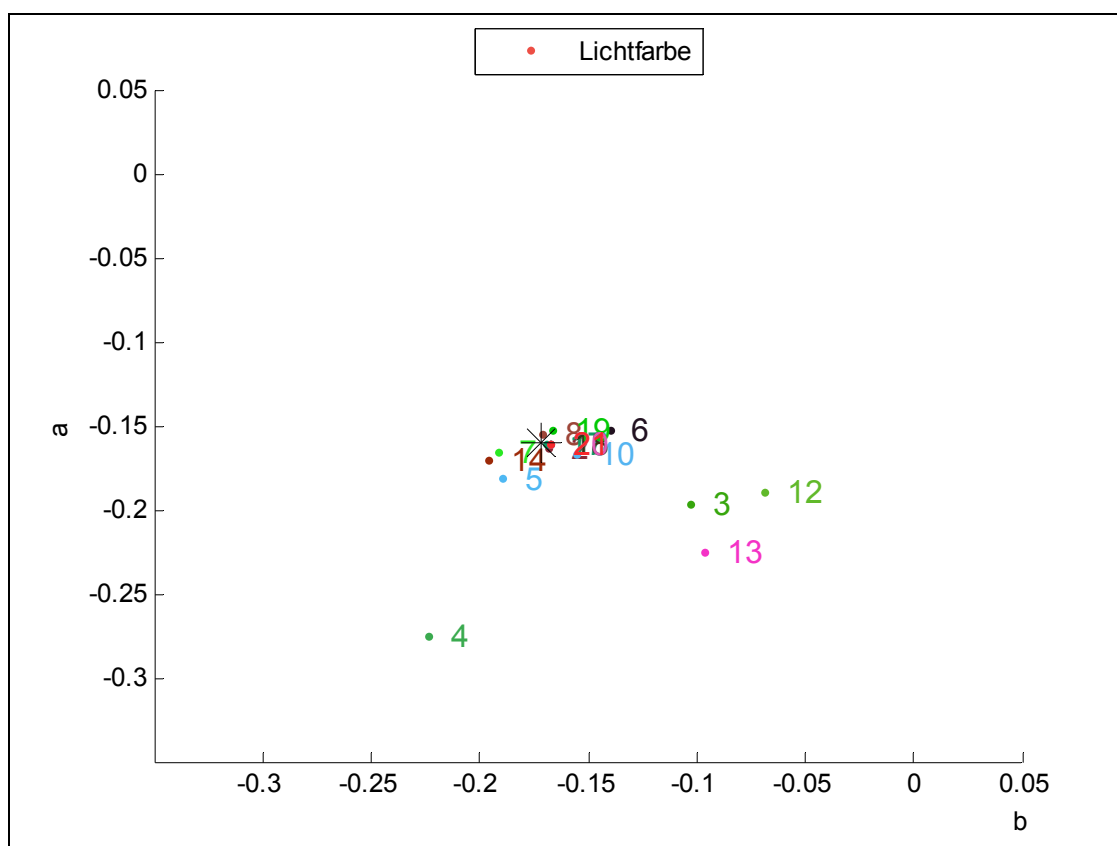
Abb. 54: Tatsächliche Transmissionsrichtung des verwendeten Filters

Im Versuch kann folglich kein maximales Nutzsignal ausgewertet werden. Dafür fehlen die Bilder mit den tatsächlichen Filterstellungen von 0° und 90° .

Da das Nutzsignal der Bildpaare 3773_3774 und 3773_3775 gleich ist, liegen auch die ermittelten Farborte der Lichtfarbe an sehr ähnlicher Stelle. Zwar ist der Polarisationsgrad nicht maximal. Seine Größe erreicht jedoch aussagekräftige Ergebnisse bei der Ermittlung der Lichtfarbe, denn fast alle Messfelder liegen nah am Referenzort. Ein falscher Farbort ergibt sich für das Gras (3), da das Signal untersteuert ist und für den Samt (13) (vgl. 6.6.3). Anders verhält es sich beim Bildpaar 3774_3775. Die weiter gestreute Wolke um den Referenzort ist auf das insgesamt schwächere Nutzsignal zurückzuführen. Gras (3), Kork (4), glatte Pflanzenblatt (6), Wolle (9), weiße Wandfarbe auf Pappe (12) und Samt (13) erreichen in den Grafiken der Beleuchtungsichte, des Polarisationsgrades und des Anteils an gültigen Pixeln im Vergleich zu den anderen Testflächen geringere Werte. Dadurch ergeben sich Fehler bei der Ermittlung der Lichtfarbe. Die Werte liegen nicht am Referenzort.



Grafik 12: Lichtfarbe 3773_3774



Grafik 13: Lichtfarbe 3774_3775

Bei der Untersuchung der Polarisationswinkel lässt sich abschließend folgendes zusammenfassen:

Die in 5.4.3 erläuterte Annahme über die Transmissionsrichtung des verwendeten Polarisationsfilters wird hier widerlegt. Aus den Filterkombinationen $0^\circ/45^\circ$ und $0^\circ/90^\circ$ ergibt sich, dass die unter 45° und 90° aufgezeichneten Bilder identisch sind:

$$0^\circ\text{-}45^\circ = 0^\circ\text{-}90^\circ, \text{ d.h. } 45^\circ = 90^\circ.$$

Demnach entspricht die tatsächliche Transmissionsrichtung der in Abb. 54: Tatsächliche Transmissionsrichtung des verwendeten Filters. Die verschiedenen Filterkombinationen ermitteln stabil die Lichtfarbe, vorausgesetzt der Polarisationsgrad ist ausreichend groß.

6.6 Eigenschaften verschiedener Oberflächen

Im Vergleich liefern die jeweiligen Messfelder unterschiedliche Stärken an Polarisationsgraden. Dies zeigt, dass der Polarisationsgrad nicht nur durch den Einfallswinkel des Lichtes, sondern auch objektspezifisch beeinflusst wird. Hier wird deshalb die Struktur verschiedener Oberflächen genauer betrachtet.

6.6.1 Matte Oberflächen

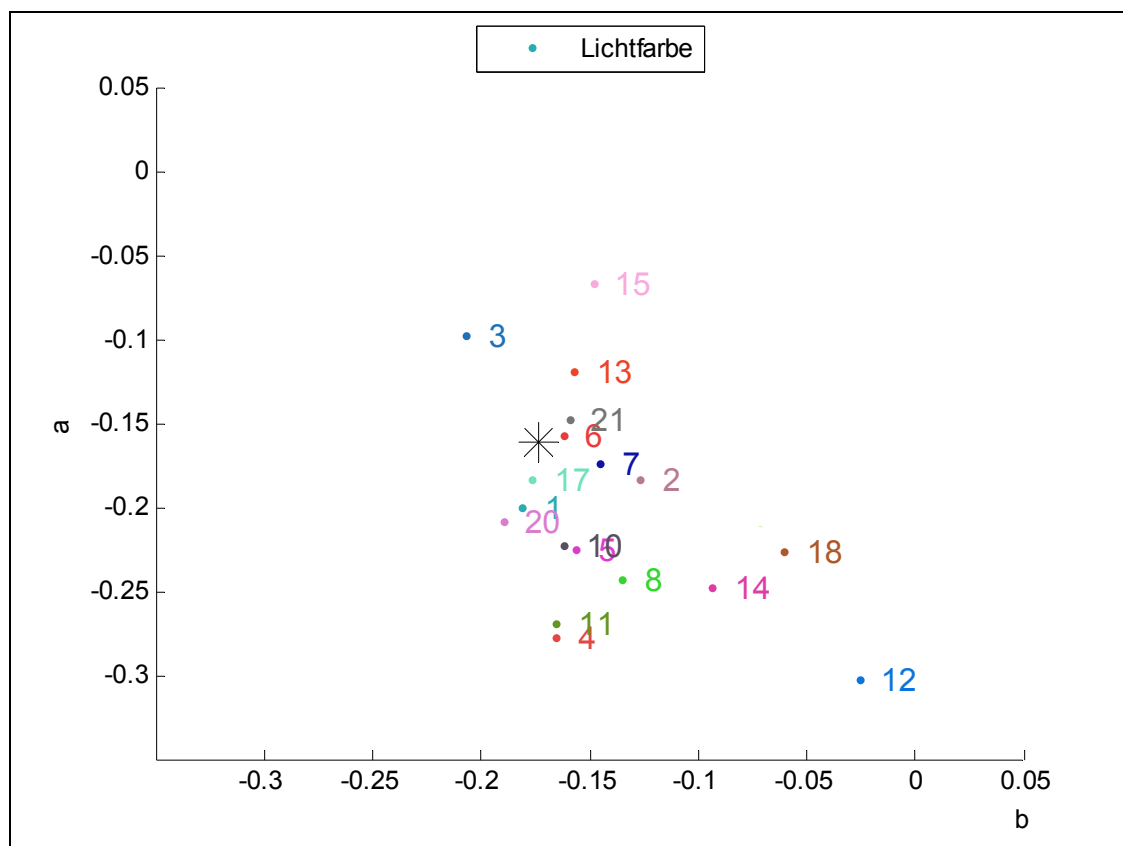
Die Reflexion an einer matten Oberfläche geschieht diffus gestreut. Die Struktur einer matten Oberfläche wird mit Hilfe des Spiegelmodells erklärt. Demnach befinden sich dort viele marginale Spiegel mit verschiedenen Ausrichtungen. Diese Vielzahl bewirkt die Reflexion zahlreicher Spiegelbilder, mit Abbildungen aus der Umgebung. Jedes Spiegelbild kann als separate Lichtquelle betrachtet werden. Bei einer matten Oberfläche ist zu erwarten, dass man unabhängig vom Ort, die Integration aller Lichtquellen einer Szene gleichzeitig beobachtet. Dies führt zu der Annahme, dass die Ermittlung der Lichtfarbe an matten Oberflächen die sichersten Ergebnisse liefert. Denn das Finden der wirksamen Lichtfarbe ist durch die Integration über alle Raumrichtungen, was meßtechnisch der Meßgeometrie der Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärke entspricht, am wahrscheinlichsten.

Für die Untersuchung an matten Oberflächen werden folgende Bildpaare ausgewählt:

Position 1, N-1, 3696_3698, (s. S. 105-106)

Position 2, N-1, 3724_3726, (s. S. 107-108)

An Position 1 finden sich die matten Oberflächen weit gestreut an ganz unterschiedlichen Farborten in der Grafik wieder. Dies ist auf den niedrigen Polarisationsgrad der dominanten Lichtquelle zurückzuführen. Denn dadurch wird bei der Messung das polarisierte Raumlicht dominanter. Diese fehlerbehaftete Messung ist sichtbar an Kork (4), grauer Pappe (5), Linoleum (8), schwarzer Pappe (10) und gelber Pappe (14).



Grafik 14: Lichtfarbe 3696_3698

Ab Position 2 überzeugen die matten Oberflächen bei der Ermittlung der Lichtfarbe. Der Kork (4), die graue Pappe (5), das matte Pflanzenblatt (7), das Linoleum (8), die schwarze Pappe (10) und das matte Photo (11) liegen im Vergleich zu den anderen Oberflächen extrem nah am Referenzort. Das beste Ergebnis erreichen (5), (8), (10) und (11). Ihre Farborte liegen in direkter Nähe des Referenzortes und überlagern sich beinahe.

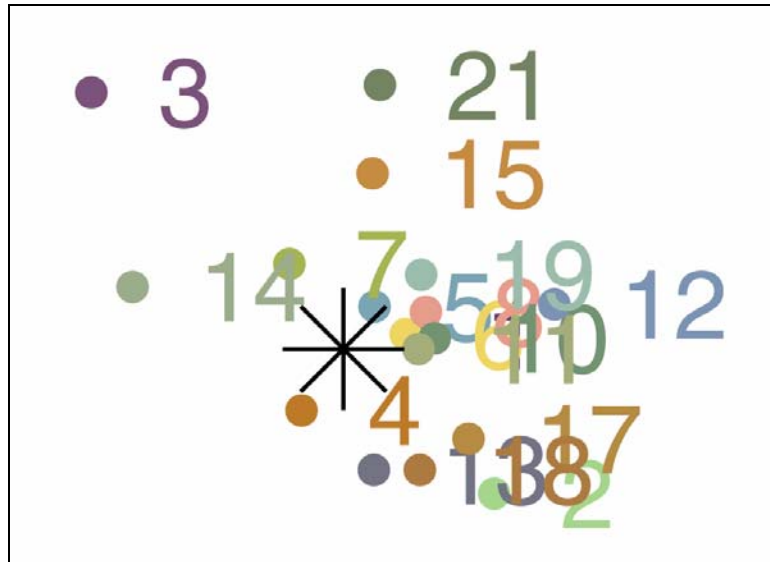


Abb. 55: 3724_3726; Detail des Referenzortes

Mit steigendem Polarisationsgrad ist diese Tendenz nicht mehr so gut in den Grafiken sichtbar, da sich dort nahezu alle Oberflächen nah am Referenzort sammeln und überlagern. Die gezeigten Beispiele bestätigen die Annahme über die Zuverlässigkeit. An matten Oberflächen findet man durch die gestreute Reflexion besonders leicht die dominante Lichtquelle, mit einer Einschränkung bei zu niedrigem Polarisationsgrad.

Insgesamt verursacht die diffuse Reflexion an matten Oberflächen eine hohe Treffsicherheit bei der Bestimmung der Lichtfarbe. Die Treffsicherheit beruht auf folgende Faktoren:

- Integration der Lichtquellen aus allen Raumrichtungen
- Unabhängigkeit vom Beobachtungsort
- Unproblematische Belichtungssteuerung

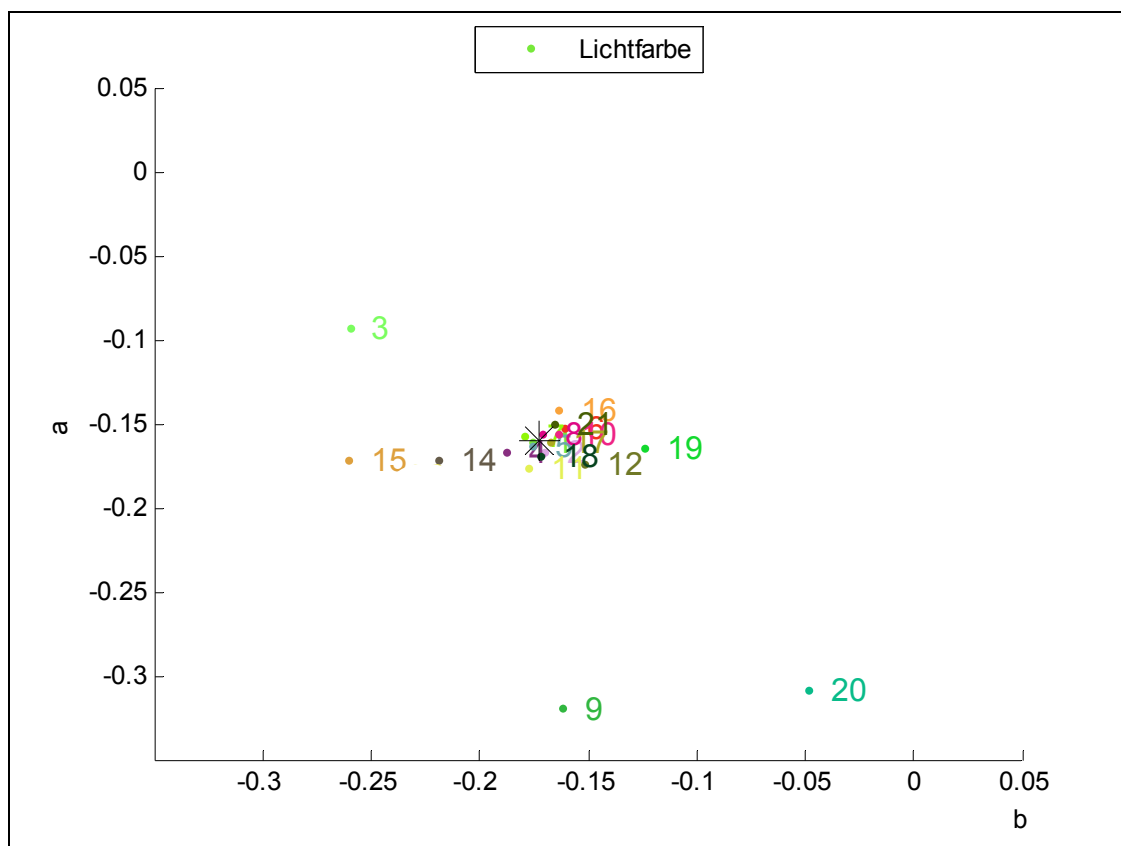
6.6.2 Glatte Oberflächen

Bei einer glatten Oberfläche passiert die Reflexion gerichtet. Die Ausrichtung der Spiegel bei der glatten Charakteristik ist annähernd gleich. Dadurch ergibt sich eine nahezu ebene Fläche, die das einfallende Licht mit Vorzugsrichtung reflektiert. Je glatter die Struktur der Oberfläche ist, desto ausgeprägter ist die Richtung definiert. Das reflektierte Licht zeigt in Abhängigkeit des Betrachtungswinkels das Spiegelbild der Lichtquelle. Dabei können alle Objekte aus der Umgebung als Lichtquelle wirken. Beim Messen des Reflexes ermittelt man nur die Lichtquelle, deren Betrachtungswinkel am Kamerastandort gleich dem Einfallswinkel ist. Die dominante Lichtquelle erzeugt den stärksten Reflex in einer Szene.

Problematisch wird die Messung, wenn der Reflex nicht die dominante Beleuchtung zeigt, sondern das Spiegelbild der farbigen Objekte aus der Umgebung. Dies führt zu einer Fehlmessung.

In Abb. 55 zeigt das Spiegelbild die dominante Lichtquelle. Die betrachteten glatten Oberflächen glattes Pflanzenblatt (6), glänzendes Photo (15) und Metallickachel (19) sind trotz der Aussteuerung mit N-1 nicht übersteuert. An allen wird annähernd die richtige Lichtfarbe gemessen.

Grafik 15 zeigt die Situation, in der die gerichteten Reflexe das Spiegelbild farbiger Objekte im Raum zeigen. Dafür wird das Motiv 3757_3759 (s. 115-116) von Position 3 mit verschwenkter Objektebene betrachtet. Das glatte Pflanzenblatt erzielt an dieser Stelle ein aussagekräftiges Ergebnis. Der Farbort liegt nah am Referenzort. Dieses untypische Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass das Objekt nicht nur glatte, sondern auch dreidimensionale Eigenschaften aufweist. Somit greift hier die Erklärung des Spiegelmodells. Dagegen bestätigt sich an dem glänzenden Photo (15), der Metallickachel (19) und der Keramikkachel (20) die Vermutung hinsichtlich der falschen Farborte bei der Messung des Raumlichtes. Diese glatten Oberflächen liegen vom Referenzort entfernt.



Grafik 15: Lichtfarbe 3757_3759; Spiegelbild zeigt Raumlicht

Das Verhältnis der größten Helligkeit zur kleinsten Helligkeit beschreibt den

Dynamikumfang einer Szene. Die Abbildung der Szene ist wiederum durch den Dynamikumfang einer DSC begrenzt. Beim Überschreiten gehen Helligkeitsbereiche in der Abbildung verloren. Zur Überschreitung kommt es besonders beim gleichzeitigen Vorhandensein von gerichteten Reflexen und dunklen Schatten. Dann wird anhand der Aussteuerung festgelegt, welcher Helligkeitsbereich abgebildet wird. Folglich ist im Histogramm mindestens eine Seite des Helligkeitsbereichs abgeschnitten.

In der folgenden Betrachtung liegt das Interesse darauf, die Funktionstauglichkeit des Verfahrens an den Grenzen des Dynamikbereichs zu untersuchen. Dazu wird die Auswertbarkeit des polarisierten Lichtanteils an hell reflektierenden Objekten mit glatten Oberflächen den dunklen Objekten mit matter Charakteristik gegenübergestellt. Die Aussteuerungsvarianten werden bezüglich der Änderung bei der ermittelten Lichtfarbe verglichen. Für die Untersuchung der glatten Oberflächen werden folgende Bilder betrachtet:

- Position 1: Reflex 3693_3695 (s. S. 125-126)
- Position 2: Reflex 3721_3723 (s. S. 127-128)
- Position 3: Reflex 3748_3750 (s. S. 129-130)
- Position 4: Reflex 3770_3772 (s. S. 131-132)
- Position 5: Reflex 3786_3788 (s. S. 133-134)

Es wurden nur 7 Messfelder für die Untersuchung der Reflexe an glatten Oberflächen ausgewählt: glattes Pflanzenblatt (1), mattes Photo (2), glänzendes Photo (3), Glas (4), Metallickachel (5), Keramikkachel (6), Styropor (7), wobei das Styropor eine matte Oberflächencharakteristik beschreibt.

Liegt der Schwerpunkt der Belichtung auf den Reflexen, erzielt man bei allen glatten Oberflächen ab Position 2 aussagekräftige Ergebnisse bei der Ermittlung der Lichtfarbe. Vergleicht man an dieser Position glatte und matte Oberfläche miteinander, ist eine weitere Auffälligkeit zu beobachten. Hier wird dazu in Abb. 56 die Keramikkachel (2) dem Styropor (7) gegenübergestellt. Die Farborte der glatten Oberfläche konzentrieren sich in einer engen Wolke um den Flächenschwerpunkt herum. Dagegen sind die Farborte der matten Oberfläche großflächig um den Flächenschwerpunkt gestreut. Dies spiegelt sich auch bei der Ermittlung der Lichtfarbe wider. Die an der Kachel ermittelte Lichtfarbe liegt in unmittelbarer Nähe des Refernzortes, wohingegen der Flächenschwerpunkt des Styropors trotz gutem Ergebnis hinsichtlich der Lichtfarbe weiter daneben liegt (Abb. 56).

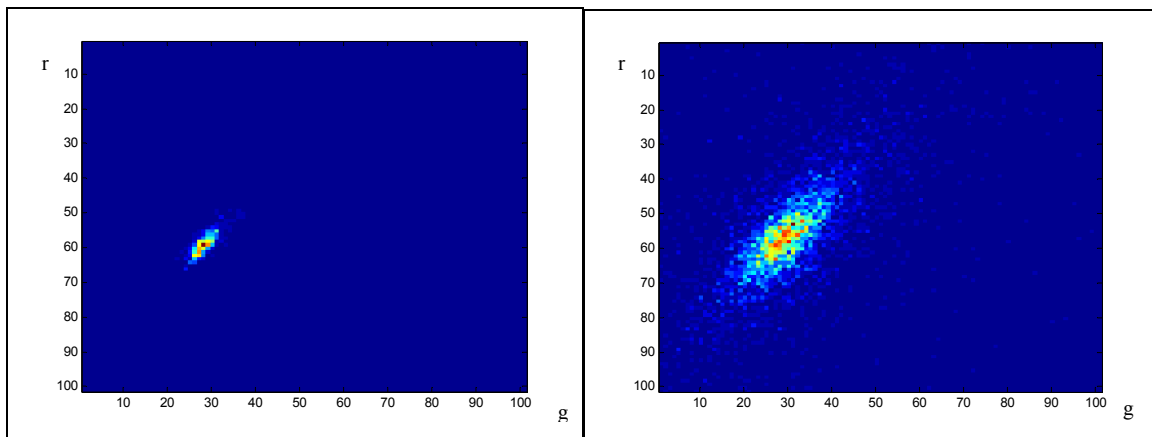
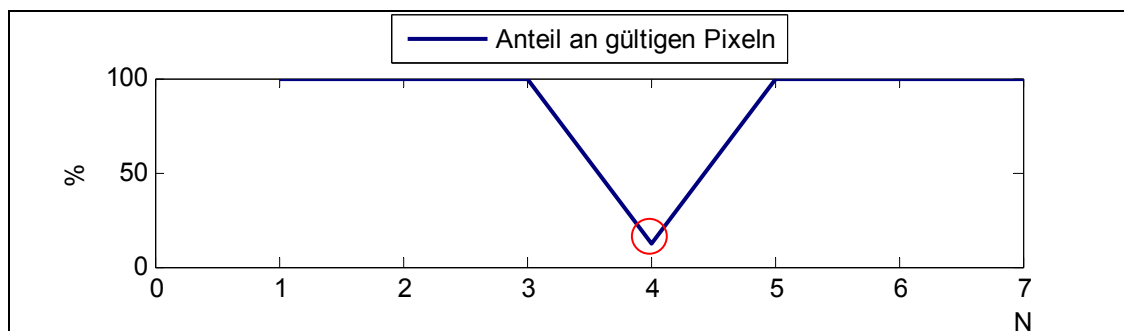


Abb. 56: 3721_3723; Farborte der Keramikachel (links), des Styropors (rechts)

Der Anteil an gültigen Pixeln ist bei allen Testflächen hoch. Mit Ausnahme vom Glas (4) an Position 4 und 5. Am Glas ist der Reflex hier am stärksten. Er ist an diesen beiden Positionen nicht optimal angesteuert. Trotzdem wird ein gutes Ergebnis für den Farbort erreicht, da der Reflex eine hohe Beleuchtungsichte erzeugt.



Grafik 16: 3786_3788

Für die Gegenüberstellung der dunklen Objekte mit matter Oberfläche werden die folgenden Bilder ausgewählt:

- Position 1: N+1,5 3700_3702 (s. S. 135-136)
- Position 2: N+1,5 3727_3729 (s. S. 137-138)
- Position 3: N+1,5 3754_3756 (s. S. 139-140)
- Position 4: N+1,5 3777_3779 (s. S. 141-142)
- Position 5: N+1,5 3792_3794 (s. S. 143-144)

Es wurden nur 2 Messfelder für die Untersuchung der Reflexion an dunklen Oberflächen betrachtet: schwarze Pappe (1), Gras (2). An der schwarzen Pappe wird die dominante

Lichtquelle noch präziser ermittelt, als bei glatten Oberflächen. Dazu wird wieder die Position 2 betrachtet.

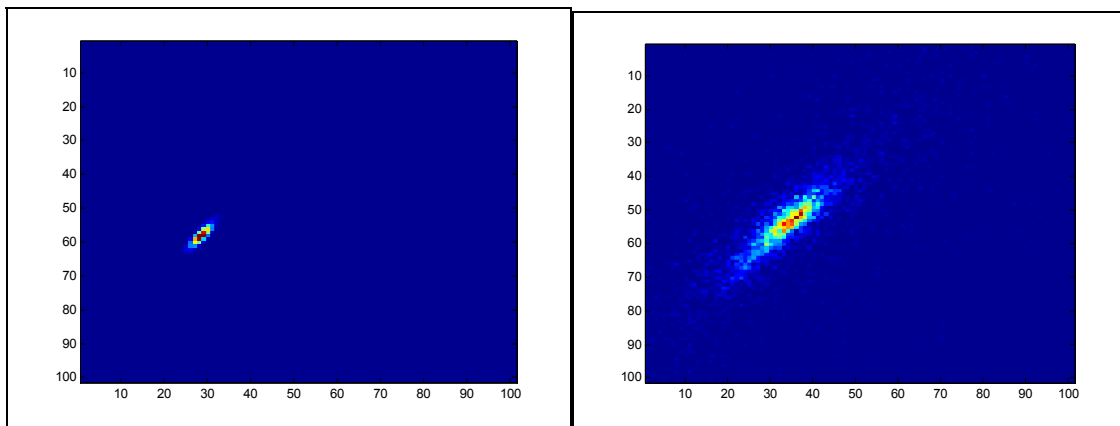
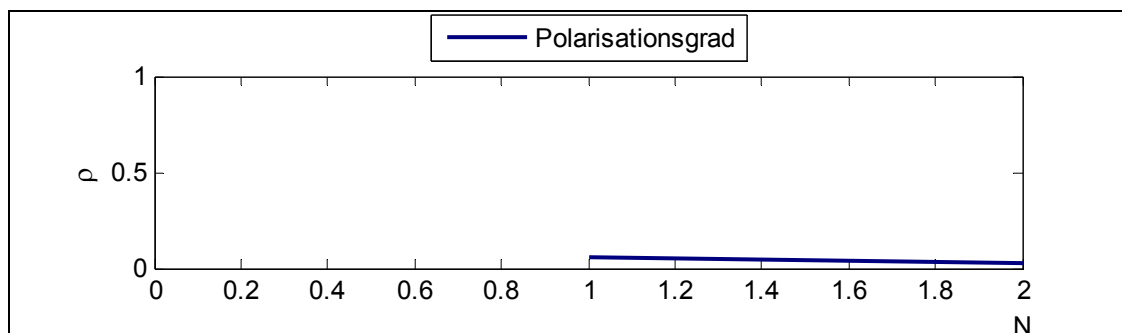


Abb. 57: 3727_3729; Farborten der schwarzen Pappe (links), des Gras (rechts)

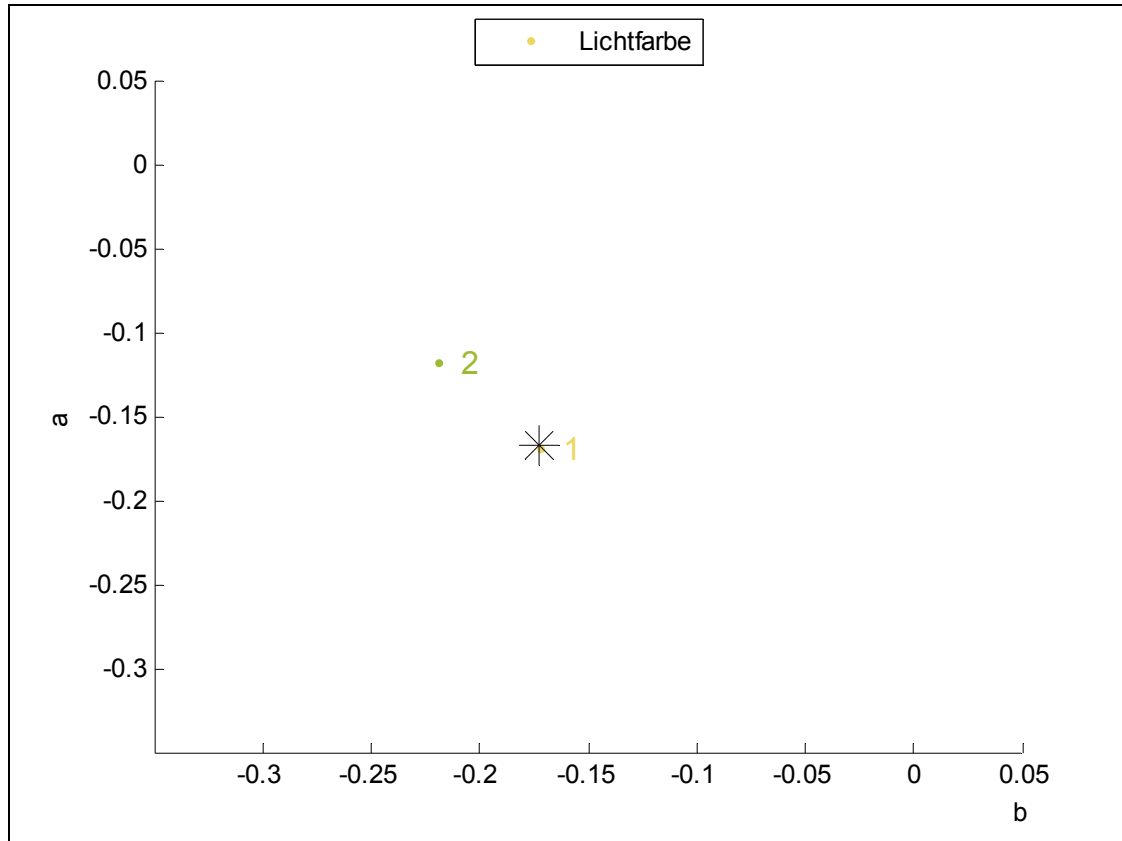
Die Wolke der schwarzen Pappe (1) ist um den Flächenschwerpunkt herum noch konzentrierter, als bei den oben dargestellten glatten Oberflächen. Diese Beobachtung lässt sich anhand der Definition des Polarisationsgrades erklären. Zwar ist der Polarisationsgrad aufgrund des kleinen Einfallswinkels an Position 2 gering. Dagegen ist das Verhältnis von reflektiertem Lichtanteil zum remittierten Lichtanteil, aufgrund der spektralen Eigenschaften der dunklen Oberfläche groß. Dies führt zu einem Polarisationsgrad, der trotz kleinem Einfallswinkel schon ein sicheres Ergebnis bei der Ermittlung der Lichtfarbe erzielt. Dafür spricht auch der hohe Anteil an gültigen Pixeln.



Grafik 17: 3727_3729; Polarisationsgrad

Mit zunehmendem Einfallswinkel wird die dominante Lichtquelle noch genauer ermittelt. Im Bereich des Brewsterwinkels erreicht man das beste Ergebnis im Vergleich zu allen anderen Testflächen. Der Farbort der dominanten Lichtquelle entspricht dem Referenzort (Grafik 18). Im Gegensatz dazu schneidet das Gras schlecht ab. Die Farborte sind weit um den Flächenschwerpunkt gestreut (Abb. 57). Somit ist auch die ermittelte Lichtfarbe vom

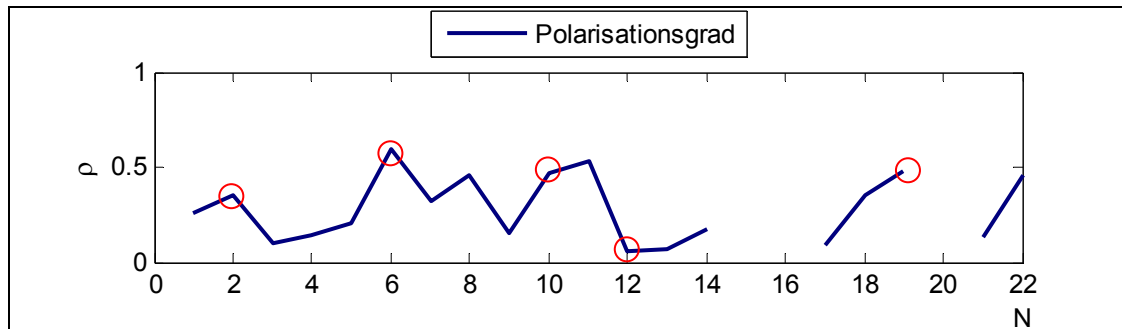
Referenzort verschoben (Grafik 18). Die schlechten SNR-Werte in Verbindung mit der dunklen Beleuchtungsdichte betonen trotz hohem Anteil an gültigen Pixeln die fehlerbehaftete Aussage dieser Oberfläche (Grafik 76).



Grafik 18: Lichtfarbe 3792_3794

Zum Schluss dieser Betrachtung wird hier noch eine Grafik gezeigt, die die vorangegangenen Beobachtungen gut vereinigt (Grafik 19). Gezeigt wird das an Position 4 mit N-1 ausgesteuerte Bildpaar 3773_3774 (Grafik 49-Grafik 51). Das zu den glatten Oberflächen gehörige Pflanzenblatt (6) und die Metallickachel (19) sind hier nicht übersteuert. Zu den matten Oberflächen zählen die graue Pappe (2), die schwarze Pappe (10) und die weiße Wandfarbe (12). Der Polarisationsgrad ist nicht nur vom Einfallswinkel und Betrachtungswinkel abhängig. Glatte Oberflächen erreichen im Vergleich zu matten Oberflächen generell höhere Werte des Polarisationsgrades. Dies ist deutlich beim Vergleich von (6) und (19) mit (2), (10) und (12) sichtbar. Zurückführen lässt sich die Beobachtung auf die hohe Intensität des gerichteten Reflexes, was die hohen Beleuchtungsdichten bestätigen. Den Einfluss der spektralen Eigenschaft einer Oberfläche auf den Polarisationsgrad erkennt man gut beim Vergleich der schwarzen Pappe (10) mit der weißen Wandfarbe (12). Im Gegensatz zur schwarzen Pappe hat die weiße Wandfarbe

einen sehr hohen Remissionsanteil. Dies verkleinert bei der Reflexion das Verhältnis von remittiertem zu polarisiertem Reflexanteil und erklärt somit den niedrigen Polarisationsgrad. Die graue Pappe (2) liegt mit dem Polarisationsgrad genau zwischen diesen beiden Werten.



Grafik 19: 3773_3774

Die glatten Oberflächen erzeugen die stärksten Reflexe mit der dominanten Lichtquelle. Von Vorteil ist die Messung an diesen Reflexen, da sie die Treffsicherheit bei der Ermittlung der wirksamen Lichtfarbe begünstigen. Die Ursache dafür liegt bei der hohen Beleuchtungsdichte, wenn das Spiegelbild bei der Reflexion an glatten Oberflächen die dominante Lichtquelle zeigt. Die Lage der Farborte sammelt sich in einer engen Wolke um den Flächenschwerpunkt herum. Nachteilig ist jedoch, dass die gerichtete Reflexion zur Übersteuerung neigt und dann kein Messergebnis liefert. Ein weiterer großer Nachteil entsteht, wenn das Spiegelbild der Reflexion nicht die dominante Lichtquelle zeigt. In diesem Falle führt die Messung zu einem fehlerhaften Ergebnis.

Anschaulich ist in der vorangegangenen Betrachtung auch der Einfluss der spektralen Eigenschaften auf den Polarisationsgrad gewesen.

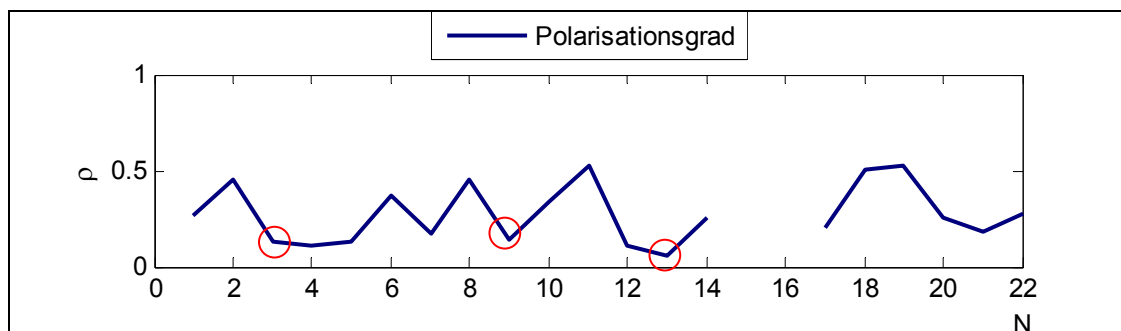
Wie zuvor schon in 6.4 erwähnt, wird im Versuch gezeigt, dass die spektralen Eigenschaften einer Körperoberfläche Auswirkungen auf den Polarisationsgrad haben. Bei gleich bleibendem Reflexionsanteil aber variierendem Remissionsanteil verändern sich die Verhältnisse innerhalb der Intensitätszusammensetzung. Dies wirkt sich wie folgt aus:

Ist das Verhältnis von polarisierter Reflexion und diffuser Remission groß, nimmt auch der Polarisationsgrad große Werte an. Im Gegensatz dazu schmälert ein kleines Verhältnis die Werte des Polarisationsgrades. Maximal wird das Verhältnis bei der Reflexion an diffuser schwarzer Pappe und minimal bei der Reflexion an weißen Oberflächen.

6.6.3 Verwinkelte Oberflächen

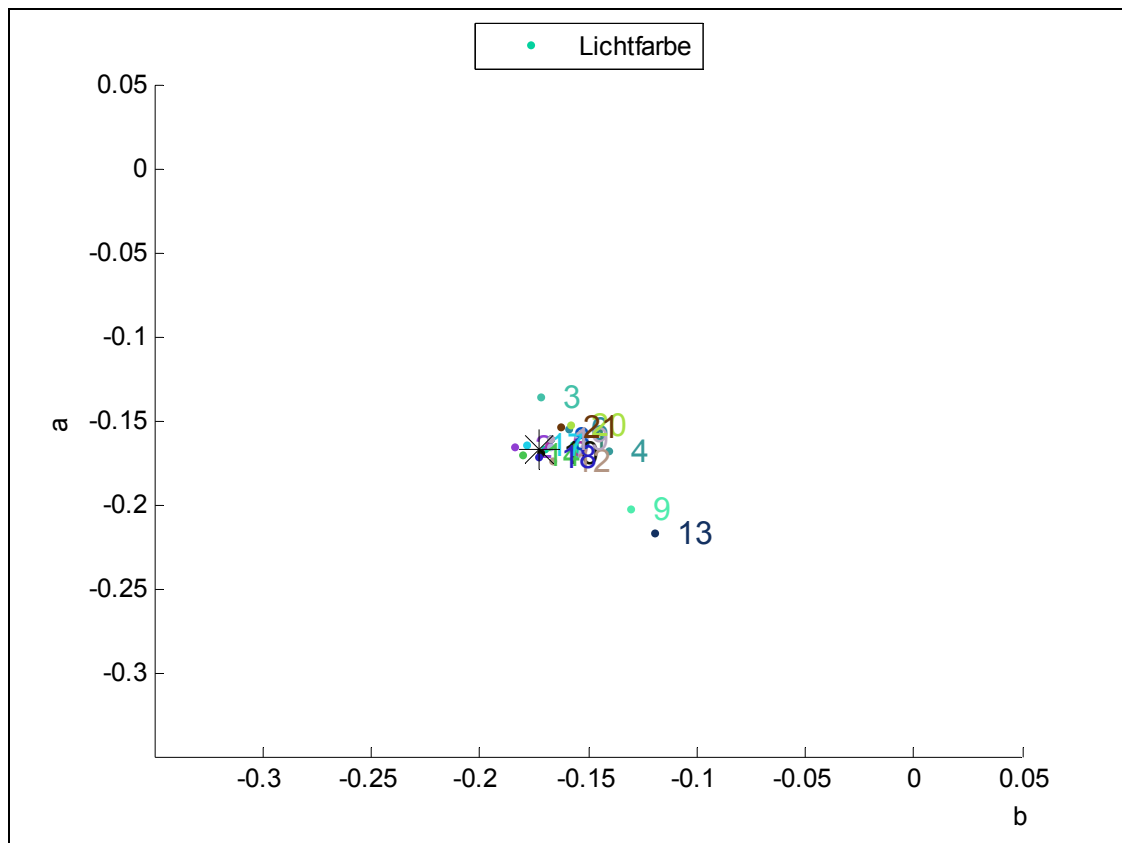
Die Struktur verwinklter Oberflächen hat nur an der direkten Oberfläche den polarisierenden Effekt bei der Reflexion. Dringt das Licht tiefer in die Oberfläche ein, kann es bei der polarisierenden Reflexion passieren, dass der reflektierte Strahl, durch die verwinkelte Struktur innerhalb des Stoffes, mehrfach reflektiert wird. Diese Mehrfachreflexion hat eine depolarisierende Wirkung zur Folge, denn dadurch geht die Polarisationsvorzugsrichtung des reflektierten Lichtanteils zum Teil verloren.

Dieser Ansatz wird an den Grafiken 3789_3791 der Position 5 mit der Aussteuerung N-1 (s. S. 113-114) veranschaulicht. Auf dem Testchart sind drei Oberflächen mit verwinklter Struktur vorhanden. Betroffen sind das Gras (3), die Wolle (9) und der Samt (13). Im Verhältnis zu den anders klassifizierten Oberflächen, erreichen diese drei beim Polarisationsgrad relativ geringe Werte, wie man gut in der folgenden Grafik erkennen kann. Dies unterstützt die Annahme über den depolarisierenden Effekt. Dafür spricht auch der Vergleich der verwinkelten Flächen miteinander. Der Effekt ist an der grobmaschigen Wolle nicht so wirkungsvoll, wie am Gras und der feinen Verwinkelung des Samtes. Am Samt ist der Effekt am stärksten ausgeprägt. Seine feine Verwinkelung spricht für eine starke Mehrfachreflexion. Hier wird der niedrigste Polarisationsgrad gemessen.



Grafik 20: 3789_3791

Zwar erreicht das Signalrauschen bei diesen Oberflächen keine zu niedrigen Werte und auch der Anteil an gültigen Pixeln ist hoch. Kritisch ist jedoch der niedrige Polarisationsgrad zusammen mit der dunklen Beleuchtungsichte zu betrachten. Dies führt zu Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Lichtfarbe. In der nächsten Grafik sieht man, dass die Farborte der drei besprochenen Oberflächen nicht am Referenzort liegen.



Grafik 21: Lichtfarbe 3789_3791

Dafür sprechen auch die großflächig gestreuten Farborte in den Histogrammen dieser drei Messfelder:

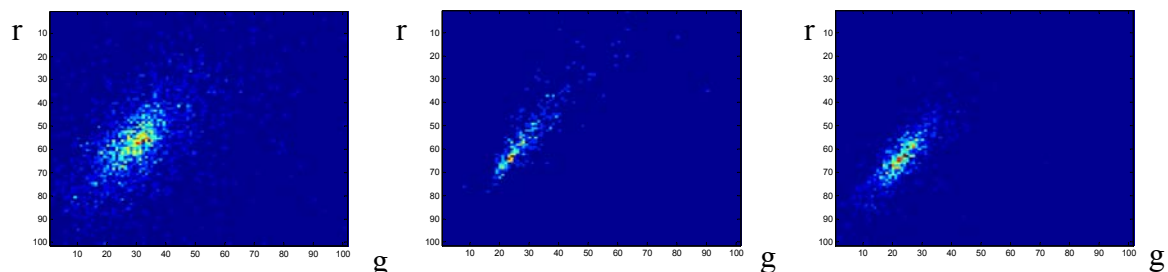


Abb. 58: 3789_3791; Histogramme der Messfelder Gras (re.), Wolle (mi.) und Samt (li.)

Auffällig ist, dass Wolle und Samt nah zusammen liegen. Diese Beobachtung kann man auch an anderen Positionen feststellen und spricht für ein stabiles Ergebnis (s. S. 110, 112). Offenbar spielen hier noch weitere Effekte eine Rolle. Beide Oberflächen ähneln sich in der Farbigkeit, sie liegen im Bereich von dunkelrot. Dies führt zu der Annahme, dass bei der Ermittlung der Lichtfarbe auch die spektralen Eigenschaften der Oberflächen Einfluss haben. Eine mögliche Erklärung ist wie folgt:

Im oberflächennahen Bereich eines verwinkelten Objektes, kann bei der Remission im Körperinneren ein Polarisierungseffekt auftreten. Dies geschieht, wenn der remittierte Strahl

vor dem Austreten aus dem Objekt noch einmal an der Körperstruktur reflektiert wird. Dadurch hat dieser polarisierte Strahl die spektralen Eigenschaften des Objektes und die Körperfarbe wird im Differenzbild sichtbar.

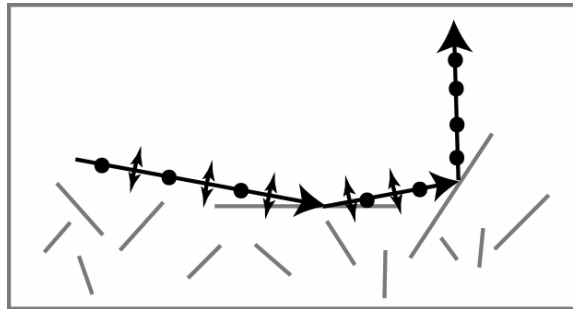
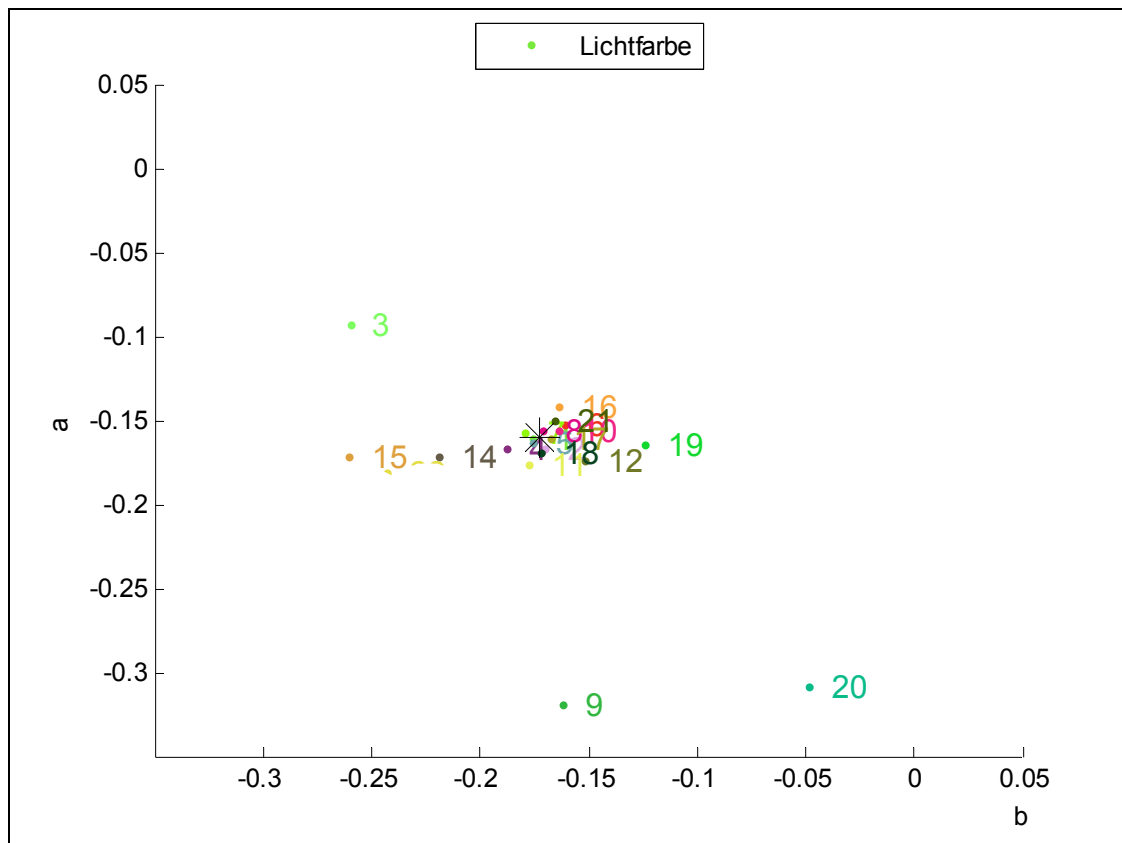


Abb. 59: Polarisierungseffekt der Remission

Ein weiterer Gesichtspunkt könnte auch ein Meßfehler der Kamera sein. Verursacht durch den mechanischen Verschluss, können zwischen den 2 Aufnahmen Belichtungsschwankungen entstehen. Dieser Effekt führt vor allem bei hellen bunten Flächen zu Meßungenauigkeiten. Auf dem Testchart sind wenig bunte Flächen vertreten. Daher ist dieses Phänomen an anderer Stelle nicht so ausgeprägt.

6.6.4 Beschichtete Oberflächen

Hier wird ein weiterer Effekt beschrieben, der die spektralen Eigenschaften eines Objektes im Differenzbild sichtbar machen kann. Dieser Effekt tritt bei beschichteten Oberflächen auf. Bei transparent beschichteten Oberflächen ist auf dem matten Träger ein glatter, transparenter Belag aufgetragen. Das unpolarisierte Licht trifft zunächst auf den matten Träger und wird dort nach Absorption diffus remittiert. Die spektrale Zusammensetzung verändert sich dabei entsprechend den Reflexionseigenschaften des Trägers. Durch die diffuse Remission ist das Licht unpolarisiert. Trifft dieser Lichtanteil danach auf die Grenzschicht von transparenter Beschichtung und Luft, tritt ein Polarisierungseffekt auf. Somit ist das austretende Licht dann polarisiert. Der spektrale Anteil wird auf dem Differenzbild sichtbar. Die glatte Beschichtung zeigt also polarisierende Wirkung. Die hier betrachteten beschichteten Oberflächen glattes Photo (15) und Keramikachel (20) weisen auch Eigenschaften der glatten Oberflächen auf. Deshalb wird in der folgenden Betrachtung ein Motiv gewählt, dass auf diesen beiden Oberflächen kein Spiegelbild der dominanten Lichtquelle zeigt. Es wird das Motiv 3757_3759 mit verschwenkter Objektebene senkrecht zu Standort 6 und der Aussteuerung N-1 ausgewählt (s. S.115-116). In der Betrachtung liefern diese beiden Oberflächen ein geringes Nutzsignal. Dies wird deutlich durch die dunklen Beleuchtungsichten, den niedrigen Polarisationsgrad und den schlechten SNR-Werten. Der Effekt der polarisierenden Remission ist aber trotzdem in Grafik 22 sichtbar. Zu diesem Ergebnis führt die Kombination eines niedrigen Polarisationsgrades mit dem ausreichenden Anteil an gültigen Pixeln. Der Mittelungsgewinn verbessert das Signalrauschen bei beiden Testflächen um fast 30 dB. In der Darstellung der Lichtfarbe befinden sich die beiden Farborte im Gegensatz zu den anderen Oberflächen weit vom Referenzort entfernt. Für die Abweichung der Farborte von Gras (3) und Wolle (9) ist der in 6.6.3 beschriebene Effekt an verwinkelten Oberflächen verantwortlich. Auffällig verhält sich auch das Ergebnis der Metallickachel (19). Diese Oberfläche tendiert wohl auch zu den Eigenschaften der beschichteten Oberflächen. Aus dem Rahmen fällt auch die gelbe Pappe (14). Verantwortlich dafür ist wohl der am Ende von 6.6.3 beschriebene Meßfehler der Kamera.



Grafik 22: Lichtfarbe 3757_3759;
Glänzendes Photo (15) und Keramikkachel (20) zeigen spektrale Eigenschaften des Objektes

6.7 Einfluss von Umgebungslicht

Bei den bisherigen Versuchen wird mit definierten Beleuchtungsbedingungen gearbeitet, damit die Orientierung des polarisierten Lichtanteils bekannt ist. Dabei wird jedoch nur die dominante Lichtquelle berücksichtigt.

An dieser Stelle wird dargestellt, inwiefern noch andere Lichtquellen auf die Messung gewirkt haben. Auf die gesamte Beleuchtung wirken neben der dominanten Lichtquelle zusätzlich noch schwächere Lichtquellen ein. Einfluss haben auch die Objekte aus der Umgebung. Sie werden zum Teil an den glatten Oberflächen gespiegelt.

Es wird versucht, die einzelnen Beleuchtungsfaktoren zu separieren. Deshalb werden drei verschiedene Beleuchtungssituationen miteinander verglichen. Ein Motiv entsteht mit der definierten Szenenbeleuchtung. Im nächsten Motiv überlagert das Leuchtstofflicht der Deckenbeleuchtung die Szenenbeleuchtung. Das dritte Motiv entsteht ohne Szenenlicht. Hier wirken nur die Deckenbeleuchtung und die Objekte aus der Umgebung. Alle Motive entstehen abends ohne den Einfluss von Tageslicht. Außerdem ist die Umgebung im Studio relativ neutral gehalten. Somit ist der Einfluss des Umgebungslichtes

vernachlässigbar klein. Es werden die folgenden Motive betrachtet. Dabei steht das Szenenlicht an Standort 1 und die Kamera an Standort 5:

N-1 3795_3797 Szenenbeleuchtung

N-1 3801_3802 Szenenbeleuchtung + Deckenbeleuchtung

N-1 3807_3808 Deckenbeleuchtung

Bei der Deckenbeleuchtung kommt das Licht von oben. Dadurch ist die Orientierung der polarisierten Lichtanteile nicht mehr definiert, wie beim Versuchsaufbau. Es zeigt sich, dass man das stärkste Nutzsignal bei der Bildpaarkombination 0° und 45° erlangt.

Betrachtet man das Histogramm der Szenenbeleuchtung (Abb. 60), ist festzustellen, dass die Farborte der Graukarte einen dichten Häufungspunkt bilden. Diese Ansammlung spricht für ein starkes Nutzsignal der dominanten Lichtquelle.

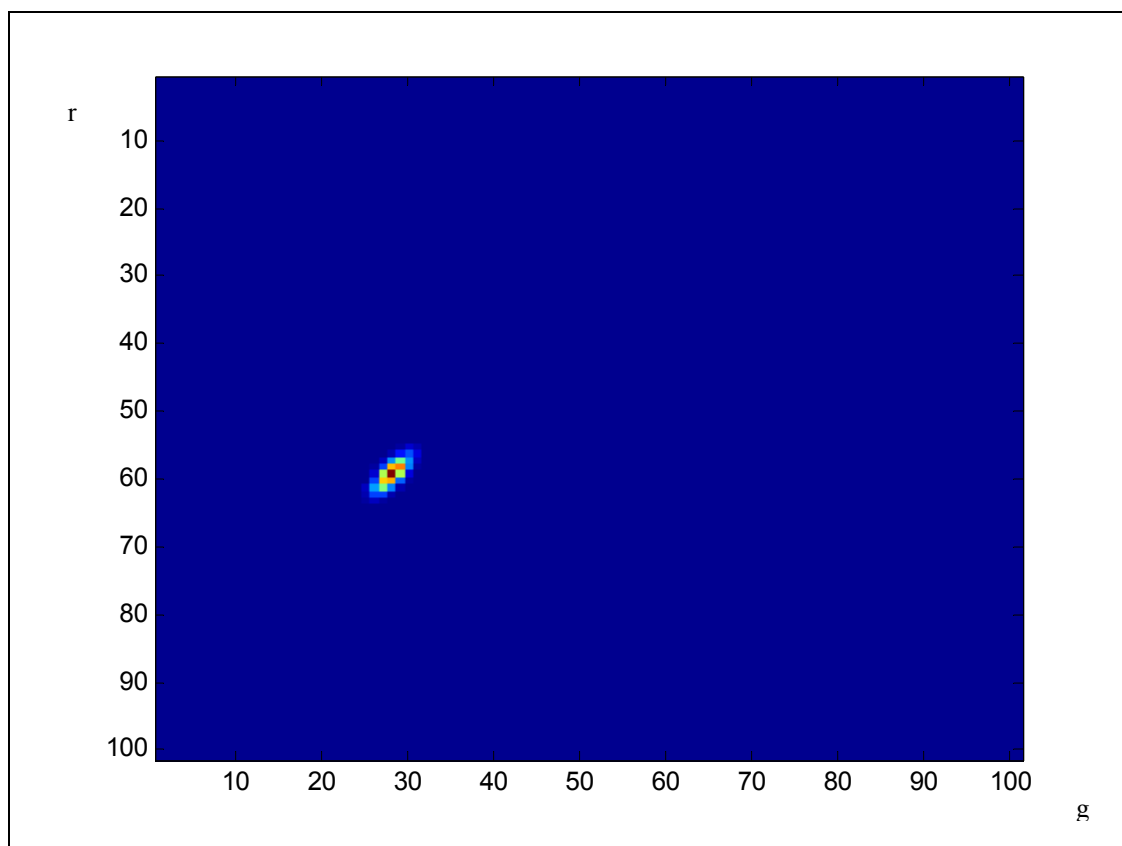


Abb. 60: 3795_3797; Farborte der Graukarte mit Szenenbeleuchtung

Dagegen ergibt sich bei der Deckenbeleuchtung eine großflächig gestreute Anordnung der Farborte. Der Flächenschwerpunkt ist von der Szenenbeleuchtung verschoben. Somit ergeben sich deutlich andere Werte bei der Ermittlung des Referenzortes (s. S. 150).

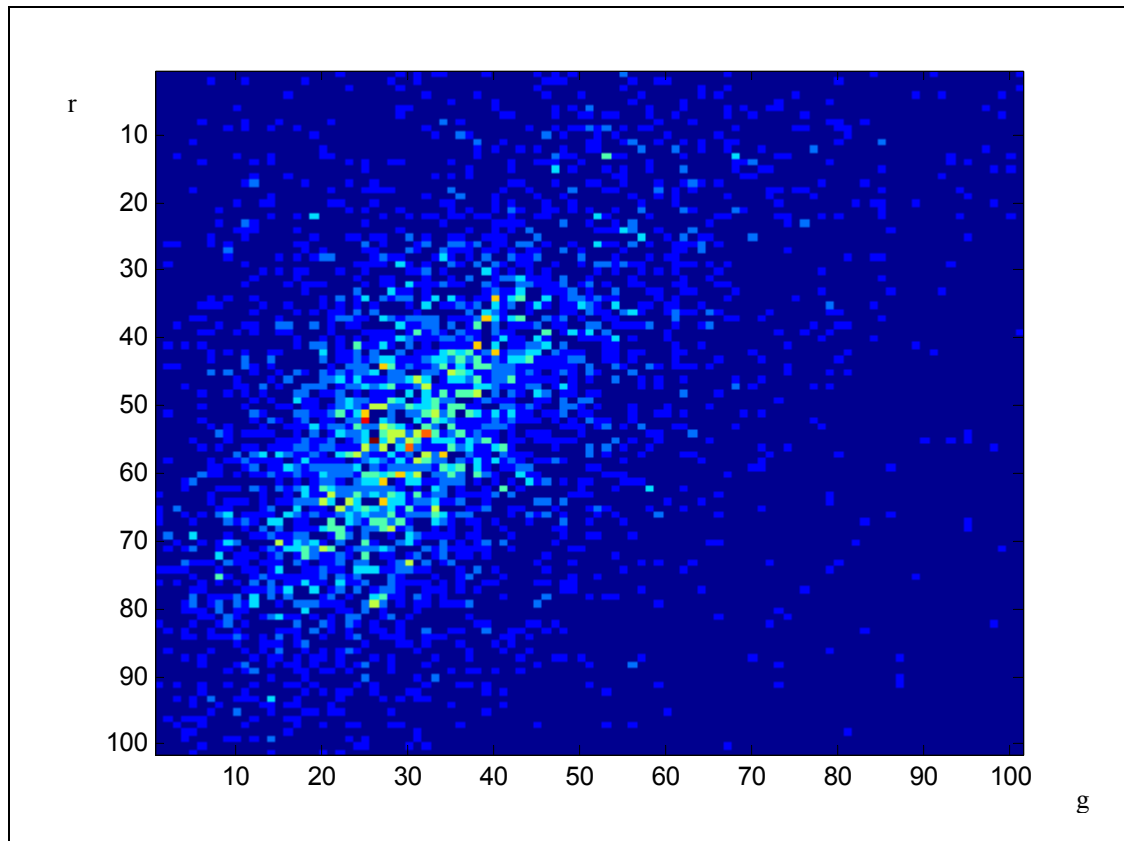


Abb. 61: 3807_3808; Farborte der Graukarte mit Deckenbeleuchtung

Im Vergleich der Referenzorte von Szenenbeleuchtung und Deckenbeleuchtung, wird ein großer Unterschied der jeweiligen beleuchtenden Lichtfarbe sichtbar. Bei der Überlagerung dieser beiden Beleuchtungen verschwindet dieser Unterschied. Die dominante Beleuchtung des Szenenlichts setzt sich gegenüber der schwächeren Deckenbeleuchtung durch. Im Histogramm bilden die Farborte einen Häufungspunkt, der von der Dichte der Ansammlung und der Lage des Flächenschwerpunktes dem Histogramm der Szenenbeleuchtung entspricht. Demnach ist hier die Wirksamkeit der Deckenbeleuchtung und des Raumlichtes gering. Dies spiegelt sich an den vergleichbaren Farborten der Lichtfarbe wider (Grafik 90, Grafik 93). Dagegen besteht eine Diskrepanz zwischen dem Farbort der Deckenbeleuchtung und dem Referenzort.

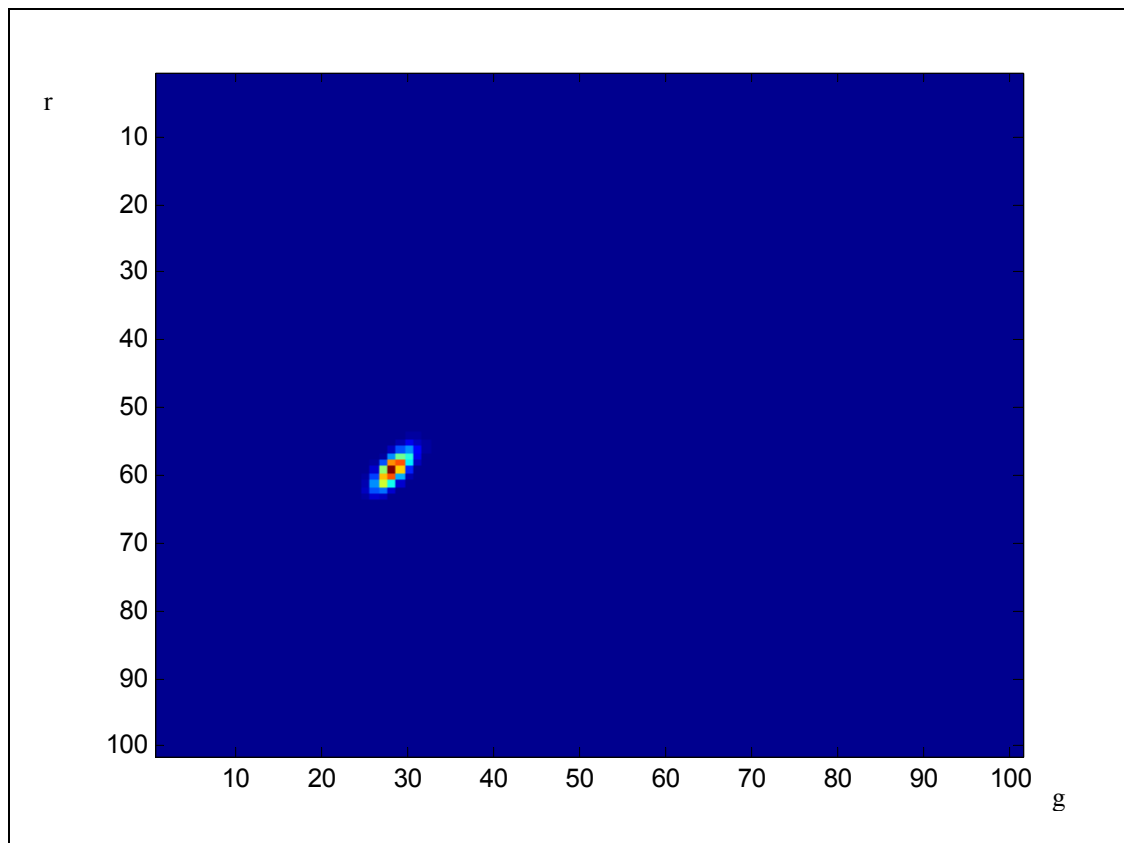


Abb. 62: 3801_3802; Farborte der Graukarte mit Szenenbeleuchtung + Deckenbeleuchtung

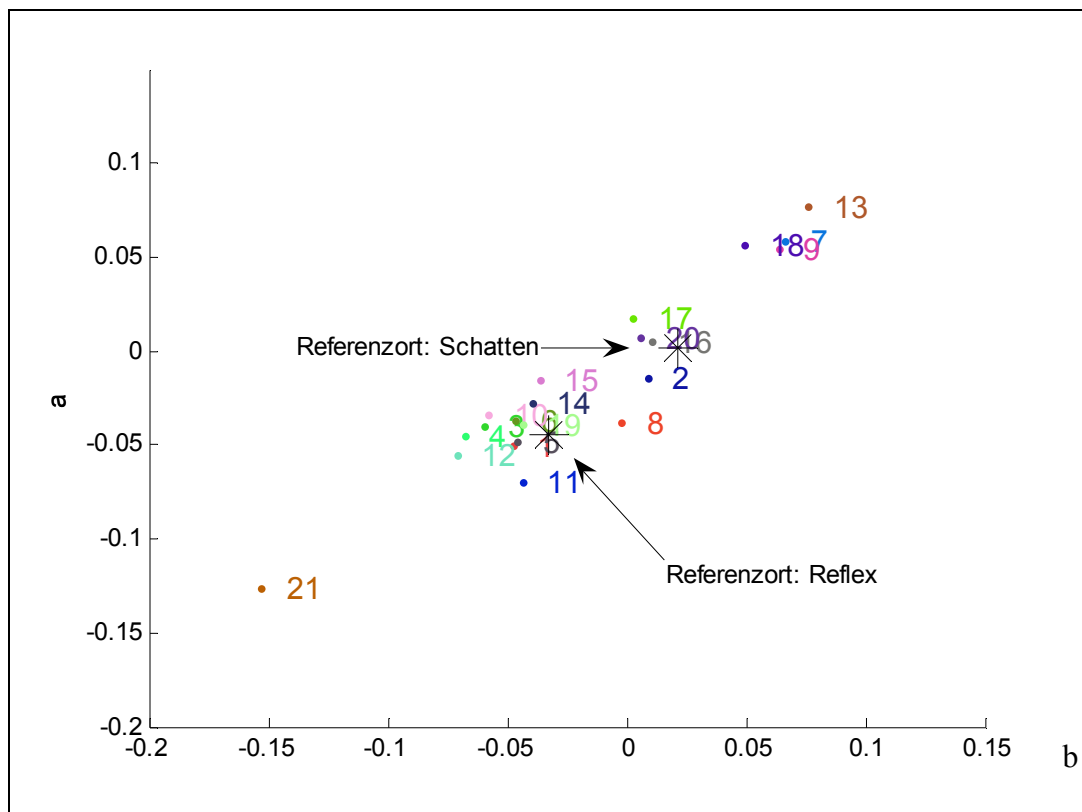
6.8 Eigenschaften des Verfahrens bei Außenaufnahmen

Das beschriebene Verfahren fordert intensitätslineare und –konstante Bildmotive bei der Untersuchung (vgl. 4.2). Diese Anforderung ist bei Außenaufnahmen besonders schwer erfüllbar, da die Motive zeitversetzt aufgezeichnet werden. Die Bewegung von Wolken führt z. B. zu erheblichen Schwankungen bei der Beleuchtungssituation. Deshalb wurden zwei Lichtsituation gewählt, die weitgehend statische Bedingungen bei der Beleuchtung garantieren. Es wurde zum einen bei nahezu wolkenlosem Himmel mit direktem Sonnenlicht gearbeitet, und zum anderen bei bedecktem Himmel mit indirekter Beleuchtung.

6.8.1 Direktes Sonnenlicht

Befindet sich eine Szene im direkten Sonnenlicht, wirken zwei wesentliche Lichtquellen auf die Bildaufzeichnung ein. Den wesentlichen Anteil übernimmt dabei das direkt einstrahlende Sonnenlicht. Hinzu kommt das durch Streuung polarisierte blaue Himmelslicht. Um die Lichtfarbe dieser beiden Lichtquellen darzustellen, wird die Graukarte zweimal unter verschiedenen Bedingungen abgebildet. Zur Ermittlung der

Lichtfarbe des Sonnenlichtes liegt die Graukarte so ausgerichtet, dass die Kamera den direkten Reflex der Sonne, sprich ihr Spiegelbild, beobachtet (Abb. 63). Das Himmelsblau ermittelt man, indem die Graukarte beim zweiten Mal im Schatten aufgenommen wird, so dass kein direktes Sonnenlicht an ihrer Oberfläche reflektiert (Abb. 63). Daraus ergeben sich bei der Darstellung der Lichtfarbe zwei Referenzorte, wie man der folgenden Grafik 23: Lichtfarbe der Außenaufnahmen bei direktem Sonnenlicht entnehmen kann:

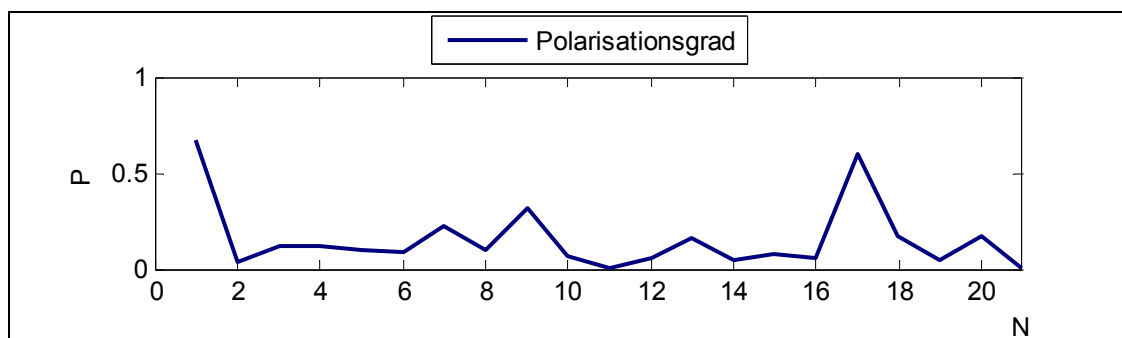


Grafik 23: Lichtfarbe der Außenaufnahmen bei direktem Sonnenlicht

Dargestellt sind die Ergebnisse der Messungen in direktem Sonnenlicht in Grafik 97 bis Grafik 99: Lichtfarbe der Außenaufnahmen bei direktem Sonnenlicht. Die Zuordnung der betrachteten Oberflächen erfolgt durch die im Anhang nummerierten Bildausschnitte in Abb. 65 bis Abb. 67. Diese Nummerierung lässt sich auf die nummerierten Farborte der Grafik 23 übertragen. Ausgewählt werden Motive, die möglichst häufig bei Außenaufnahmen vorkommen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Abbildungen von Himmel, Gras und Bäumen, Asphalt, Mauer und Stein. Die Klassifizierung der verschiedenen Motive lässt sich anhand der ermittelten Farborte wieder finden. Die Messungen am Himmel, (7), (9), (13) und (18) tendieren zu ähnlichen Farborten. Der starke Einfluss des Himmelsblau wird sichtbar, durch den gleichen Abstand von Referenzort: Schatten zu Himmelsmessungen und Referenzort: Schatten zu Referenzort: Reflex. An den Messungen der Graukarte im Schatten (2), des Schattens am

Auto (16), den Spiegelungen des Himmels an Glas (17) und (20) dominiert ebenfalls die Beleuchtung mit Himmelsblau. Die direkten Reflexe des Sonnenlichtes sind gut messbar an Oberflächen wie Gras, Blätterwerk von Bäumen und Sträuchern, Asphalt, Steinen und Mauern: (1), (3), (4), (5), (6), (8), (10), (11), (12), (14), (15) und (19).

Messung (21) fällt aus dem Rahmen. Aus Betrachtungswinkel im Zusammenhang mit dem einfallenden Sonnenlicht resultiert an dieser Asphaltoberfläche im Gegensatz zu den anderen Messungen ein zu niedriger Polarisationsgrad.



Grafik 24: Polarisationsgrad der Außenaufnahmen bei direktem Sonnenlicht

In der Abb. 63 wird anhand der Lage der Farborte noch mal sichtbar, dass sich die direkten Reflexe des Sonnenlichts im Gegensatz zum diffusen Himmelsblau stärker durchsetzen.

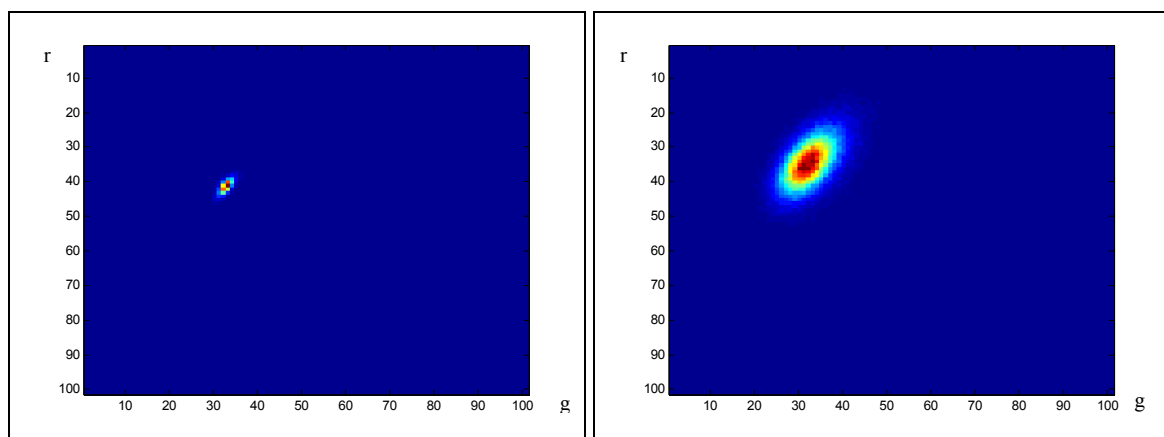
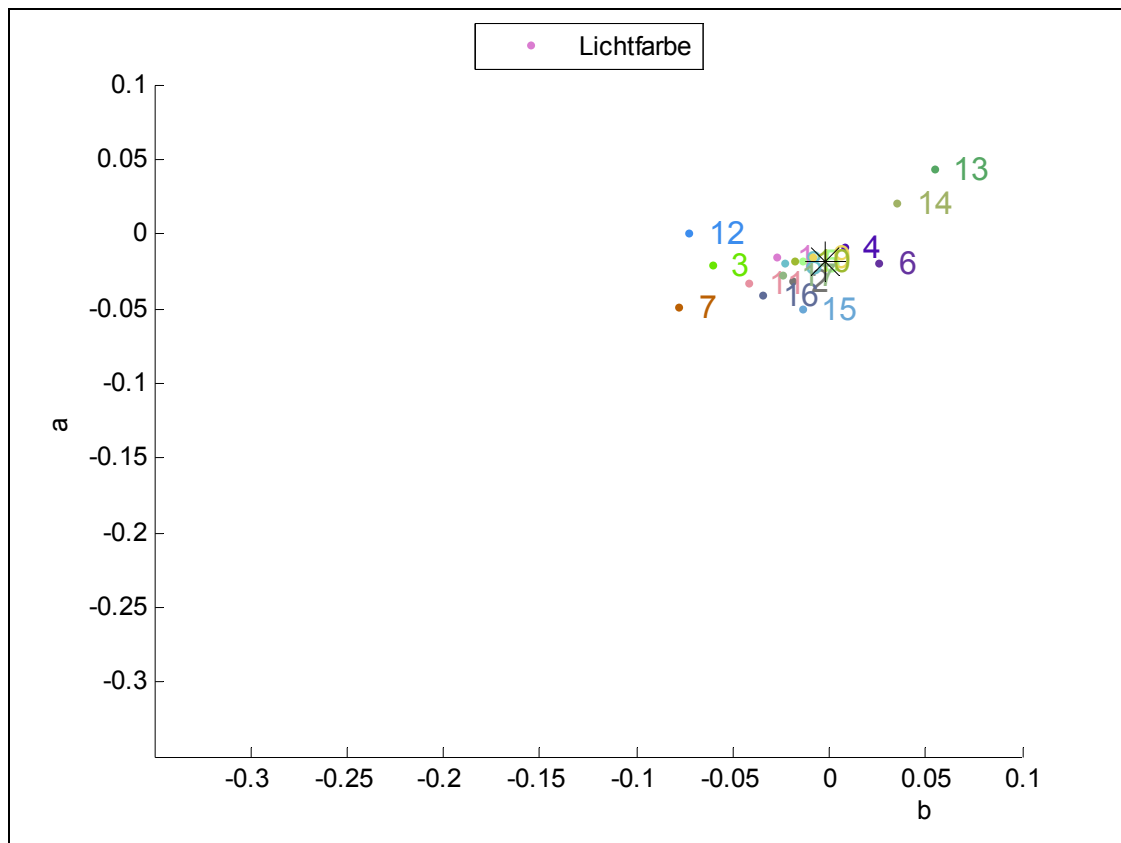


Abb. 63: Farborte der Graukarte mit Reflex (links); Farborte der Graukarte im Schatten (rechts)

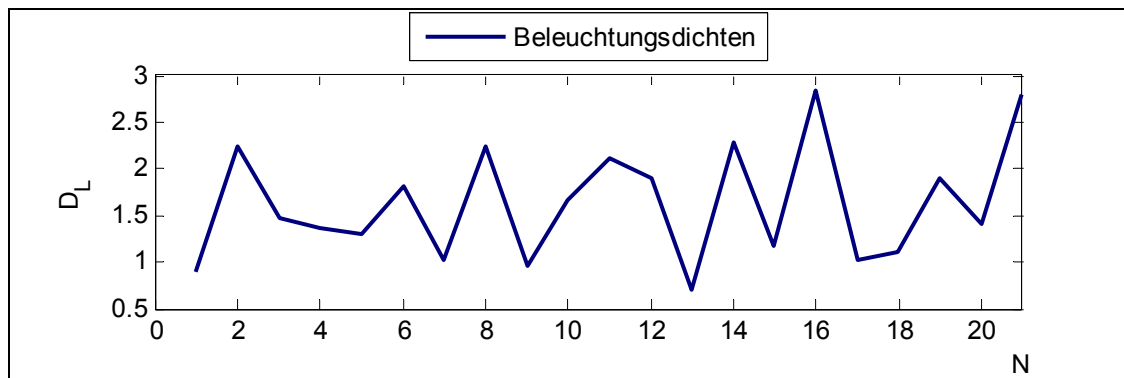
6.8.2 Indirektes Sonnenlicht

Bei bedecktem Himmel bewirkt die geschlossene Wolkendecke, dass die Szene mit diffus gestreutem Sonnenlicht beleuchtet wird. Die Versuchsergebnisse der Messungen bei diffuser Beleuchtung sind in Grafik 100 bis Grafik 102 zu finden. Die Messung der Lichtfarbe tendiert bei allen Oberflächen dazu, sich in Richtung Referenzort anzusammeln:

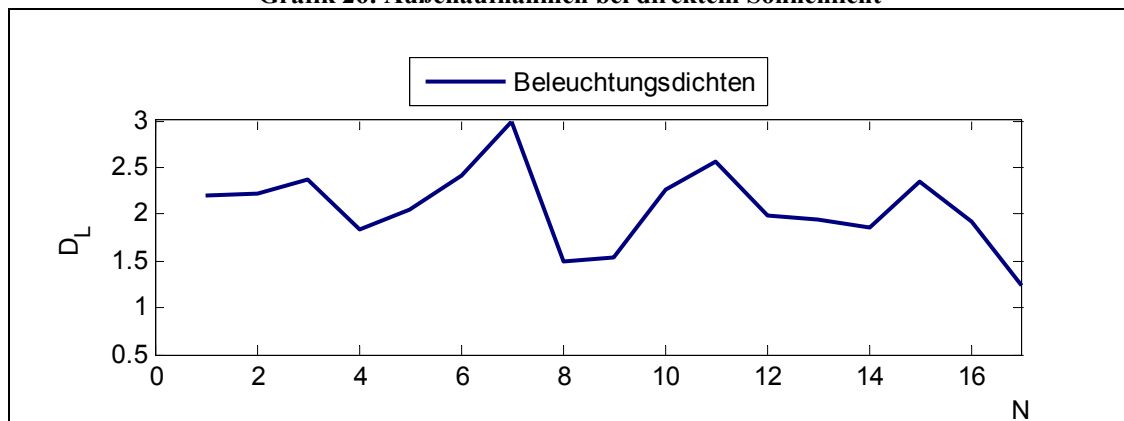


Grafik 25: Lichtfarbe der Außenaufnahmen bei indirektem Sonnenlicht

Bricht die Wolkendecke auf, muss der Einfluss des Himmelsblaus mit berücksichtigt werden. Dieser Fall wird an den Messungen (13) und (14) sichtbar und erklärt die in Richtung Himmelsblau verschobene Lage dieser beiden Farbpunkte. Die Farbpunkte der (3), (7) und (12) liegen ebenfalls entfernt vom Referenzort. Wahrscheinlich erreichen diese Oberflächen in diesem Fall ein zu geringes Nutzsignal. Generell kann man jedoch sagen, dass bei diffusem Sonnenlicht weniger Messungenauigkeiten vorkommen, da die verschiedenen Oberflächen tendenziell die gleiche Lichtfarbe ermitteln. Im Gegensatz zur Beleuchtung mit direktem Sonnenlicht erreichen die Messungen hier nicht so hohe Werte in den Beleuchtungsichten. Die Abschwächung der Intensität bewirkt hier demnach ein schwächeres Nutzsignal.



Grafik 26: Außenaufnahmen bei direktem Sonnenlicht



Grafik 27: Außenaufnahmen bei indirektem Sonnenlicht

6.9 Zusammenfassung der kritischen Fälle

Bezüglich der Oberflächeneigenschaften kann man einige Effekte beobachten, die mit dem neuen Weißabgleichsverfahren zu Fehlmessungen führen können. Sie werden hier noch mal kurz zusammengefasst.

6.9.1 Schwaches Nutzsignal

Ein schwaches Nutzsignal ergibt sich, wenn der Ein- und Ausfallswinkel zwischen Lichtquelle und Kamera zu gering ist. Dadurch verschwindet der Polarisationsgrad. Ursache eines kleinen Nutzsignals kann auch die unzureichende Beleuchtungsstärke einer Oberfläche sein. Dann sind die Werte der Beleuchtungsichte hoch.

6.9.2 Gerichtete Reflexion

Ein Messfehler entsteht an glatten Oberflächen, wenn die Spiegelung des gerichteten Reflexes nicht die dominante Lichtquelle zeigt. In diesem Fall werden die spektralen Eigenschaften des tatsächlich gezeigten Objektes im Raum als beleuchtende Lichtfarbe

interpretiert. Die Ermittlung der Korrekturwerte anhand dieser Lichtfarbe führt zu einem fehlerhaften Weißabgleich.

6.9.3 Mehrfachreflexion

Der depolarisierende Effekt tritt bei der Mehrfachreflexion an verwinkelten Oberflächen auf. Er bewirkt eine Abschwächung des Polarisationsgrades. Somit ist in diesem Fall auch das Nutzsignal geschwächt, wodurch die Ermittlung der Lichtfarbe beeinträchtigt wird.

6.9.4 Polarisierte Remission

Die polarisierte Remission kann an beschichteten Oberflächen und in den oberflächennahen Bereichen verwinkelter Objekte beobachtet werden. Durch diesen Effekt enthält der polarisierte Lichtanteil die spektrale Information eines Objektes. Dies verfälscht ebenfalls das Messergebnis, da die spektralen Informationen polarisiert sind und somit im Nutzsignal auftauchen. Anstelle der beleuchtenden Lichtfarbe wird dann die Farbe eines Objektes ermittelt.

6.9.5 Ungenauigkeiten der Belichtungssteuerung

Helle bunte Flächen sind kritisch bezüglich Messfehler bei der Bildaufzeichnung. Ursache ist der mechanische Verschluss einer Kamera. Durch unterschiedliche Zeitpunkte der 2 Aufnahmen können zusätzliche Belichtungsschwankungen entstehen. Dadurch ist die Intensitätskonstanz der Bildsignale nicht mehr gewährleistet. Folglich können im Differenzbild spektrale Anteile erscheinen, die nicht zur Lichtfarbe gehören. Bei hellen bunten Flächen ist dieser Messfehler durch die hohen Remissionsanteile am stärksten ausgeprägt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit liefert insgesamt viel versprechende Versuchsergebnisse. Überzeugend ist vor allen Dingen die erreichte Genauigkeit des Verfahrens im Rahmen dieser Grundlagenuntersuchung. Die theoretischen Betrachtungen zu den physikalischen Eigenschaften des Verfahrens werden in der praktischen Anwendung erfolgreich bestätigt. Sehr anschaulich lässt sich der Einfluss der physikalischen Mechanismen auf die Gestalt des Nutzsignals mit dem entwickelten Spiegelmodell erklären und somit die Wirkungsweise des Verfahrens darstellen. Entscheidend für den Polarisationsgrad der reflektierten Strahlanteile stellt sich demnach der Öffnungswinkel von Beleuchtung und Kamera bezogen auf die auszuwertende Objektoberfläche dar.

Ein starkes Nutzsignal zeichnet sich durch helle Beleuchtungsdichten, hohen Polarisationsgrad, großen Anteil an gültigen Pixeln, hohen Mittelungsgewinn und hohe SNR-Werte aus. Bezogen auf den Polarisationsgrad lassen sich aus den Ergebnissen der Untersuchungen folgende Funktionskriterien formulieren:

Abhängigkeit des Polarisationsgrads vom Ein- und Ausfallswinkel:

- Rückgang des Polarisationsgrades bei Verkleinerung von Ein- und Ausfallswinkel
- Wachstum des Polarisationsgrades bei Vergrößerung von Ein- und Ausfallswinkel
- Verlust des Polarisationsgrades bei zu niedrigen Ein- und Ausfallswinkel
- Maximum des Polarisationsgrades im Bereich des Brewsterwinkels
- Stärkster Reflexionsgrad an glatten und dunklen matten Oberflächen
- Schwächster Reflexionsgrad an verwinkelten Oberflächen

Einfluss der Ausrichtung einer Oberfläche auf den Polarisationsgrad:

- Polarisationsgrad des reflektierten Lichtanteils ist aufgrund des Spiegelmodells unabhängig von der Ausrichtung
- Polarisationsgrad der überlagerten reflektierten und remittierten Lichtanteile ist durch ihre unterschiedliche Lichtverteilung abhängig von der Ausrichtung

Einfluss der Polarisationsrichtung:

- Verfahren arbeitet bei verschiedenen Filterkombinationen stabil, vorausgesetzt der Polarisationsgrad ist groß genug
- Definierte Bedingungen mit einer Lichtquelle benötigen nur zwei Polarisationsrichtungen
- Undefinierte Beleuchtungsbedingung macht Auswertung mehrerer Polarisationsrichtungen erforderlich

Ein weiterer Gesichtspunkt ist die objektspezifische Untersuchung verschiedener Oberflächen. Die Untersuchung der vier unterschiedlichen Klassifikationen führt zu folgenden Erkenntnissen:

Matte Oberflächen überzeugen mit hoher Treffsicherheit bei der Ermittlung der Lichtfarbe durch die

- Integration der Lichtquellen aus allen Raumrichtungen,
- Unabhängigkeit der Messung vom Beobachtungsort und
- Unproblematische Belichtungssteuerung.

Glatte Oberflächen überzeugen mit hoher Treffsicherheit bei der Ermittlung der Lichtfarbe durch die

- Messung des Spiegelbildes der dominanten Lichtquelle.
- Problematisch ist die Messung an der spiegelnden Reflexion des schwächeren Raumlicht.
- Problematisch ist die Aussteuerung der starken Reflexion der dominanten Lichtquelle.

Einfluss unterschiedlicher Lichtverteilungen von reflektierter und remittierter Strahlung auf den Polarisationsgrad:

- Hell reflektierende Objekte mit glatter Oberfläche erreichen hohen Polarisationsgrad
- Dunkle Objekte mit matter Oberfläche erreichen hohen Polarisationsgrad
- Helle Objekte mit matter Oberfläche erreichen niedrigeren Polarisationsgrad

Verwinkelte Oberflächen scheitern häufig bei der Ermittlung der Lichtfarbe:

- Depolarisierende Effekte bei der Mehrfachreflexion verursachen oft sehr geringen Polarisationsgrad

Beschichtete Oberflächen sind unsicher bei der Ermittlung der Lichtfarbe:

- Transparente Beschichtung bewirkt als Polarisator den Effekt der polarisierte Remission

Einfluss von Umgebungslicht bei der Ermittlung der Lichtfarbe:

- Wirksame Lichtfarbe setzt sich bei Mischlichtsituationen durch, vorausgesetzt sie ist dominant gegenüber anderen Lichtfarben.

Die Untersuchung vermittelt für die Praxistauglichkeit des Verfahrens einen ersten Eindruck. Gegenübergestellt werden dazu Außenaufnahmen bei direktem und indirektem Sonnenlicht.

Direktes Sonnenlicht bei der Ermittlung der Lichtfarbe:

- Zwei wirksame Lichtquellen feststellbar: direkt einstrahlendes Sonnenlicht und blaues Himmelslicht
- Direktes Sonnenlicht ist dominant bei der Messung an Oberflächen wie Gras, Blätterwerk von Bäumen, Asphalt, Steinen und Mauern
- Himmelsblau ist dominante bei der Messung an Oberflächen im Schatten, des Himmels und Spiegelungen des Himmels z. B. an Glasfenstern
- Reflexe des direkten Sonnenlichts erreichen stärkeres Nutzsignal als Himmelsblau

Indirektes Sonnenlicht bei der Ermittlung der Lichtfarbe:

- Indirektes Sonnenlicht zeigt an allen Oberflächen ähnliche Ergebnisse
- Reflexe des indirekten Sonnenlichts erreichen schwächeres Nutzsignal als direktes Sonnenlicht

Erstaunlich ist die Treffsicherheit bei der Ermittlung der beleuchtenden Lichtfarbe einer Szene, insbesondere im Hinblick darauf, dass in der Arbeit ein recht simpler Algorithmus zum Einsatz kommt. Durch eine Optimierung des Verfahrens sind demnach noch wesentliche Verbesserungen im Hinblick auf die Treffsicherheit zu erwarten. Die Erkenntnisse über kritische Situationen sollten in die Optimierung des Verfahrens mit einbezogen werden. Andernfalls führt die Messung hier zu einem fehlerhaften

Weißabgleich. Kritisch sind die dargestellten Situationen:

- Schwaches Nutzsignal durch zu niedrigen Ein- und Ausfallswinkel oder hohe Beleuchtungsichte
- Messung von Spiegelbildern an glatten Oberflächen, die nicht die dominante Beleuchtung darstellen
- Depolarisierender Effekt durch Mehrfachreflexion an verwinkelten Oberflächen
- Polarisierende Remission an beschichteten Oberflächen
- Ungenauigkeiten der Belichtungssteuerung ausgelöst durch den mechanischen Verschluss bei der zeitversetzten Bildaufzeichnung

Ein möglicher Ansatzpunkt der Optimierung ist die Lokalisation der beschriebenen Fälle bei der elektronischen Weiterverarbeitung.

Anhang

Die folgenden Grafiken gehören zu den untersuchten Bildpaaren. Folgende Testoberflächen wurden betrachtet. Ihre Zuordnung in den Grafiken erfolgt über die Nummerierung:

Nummerierung	Testoberfläche	Nummerierung	Testoberfläche
1	Leermessung	12	weiße Wandfarbe auf Pappe
2	Graukarte	13	Samt
3	Gras	14	gelbe Pappe
4	Kork	15	glänzendes Photo
5	graue Pappe	16	Glas
6	glattes Pflanzenblatt	17	Kachelrückseite
7	mattes Pflanzenblatt	18	Kachel mit grauem Mattlack
8	Linoleum	19	Kachel mit rotem Metalliclack
9	Wolle	20	Keramikkachel
10	schwarze Pappe	21	Styropor
11	mattes Photo	22	Leermessung

Die Zuordnung der Bilder erfolgt durch die Verwendung eines Schlüssels:

Position 1 N-1 3696_3698

Zu Beginn wird der Versuchsaufbau definiert. Position 3 bezeichnet zum Beispiel den Versuchsaufbau mit Licht am Standort 3 und Kamera am Standort 7.

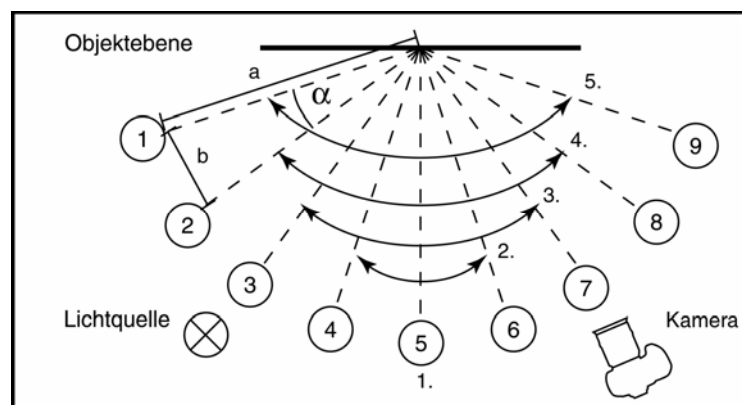


Abb. 64: Positionen im Versuchsaufbau

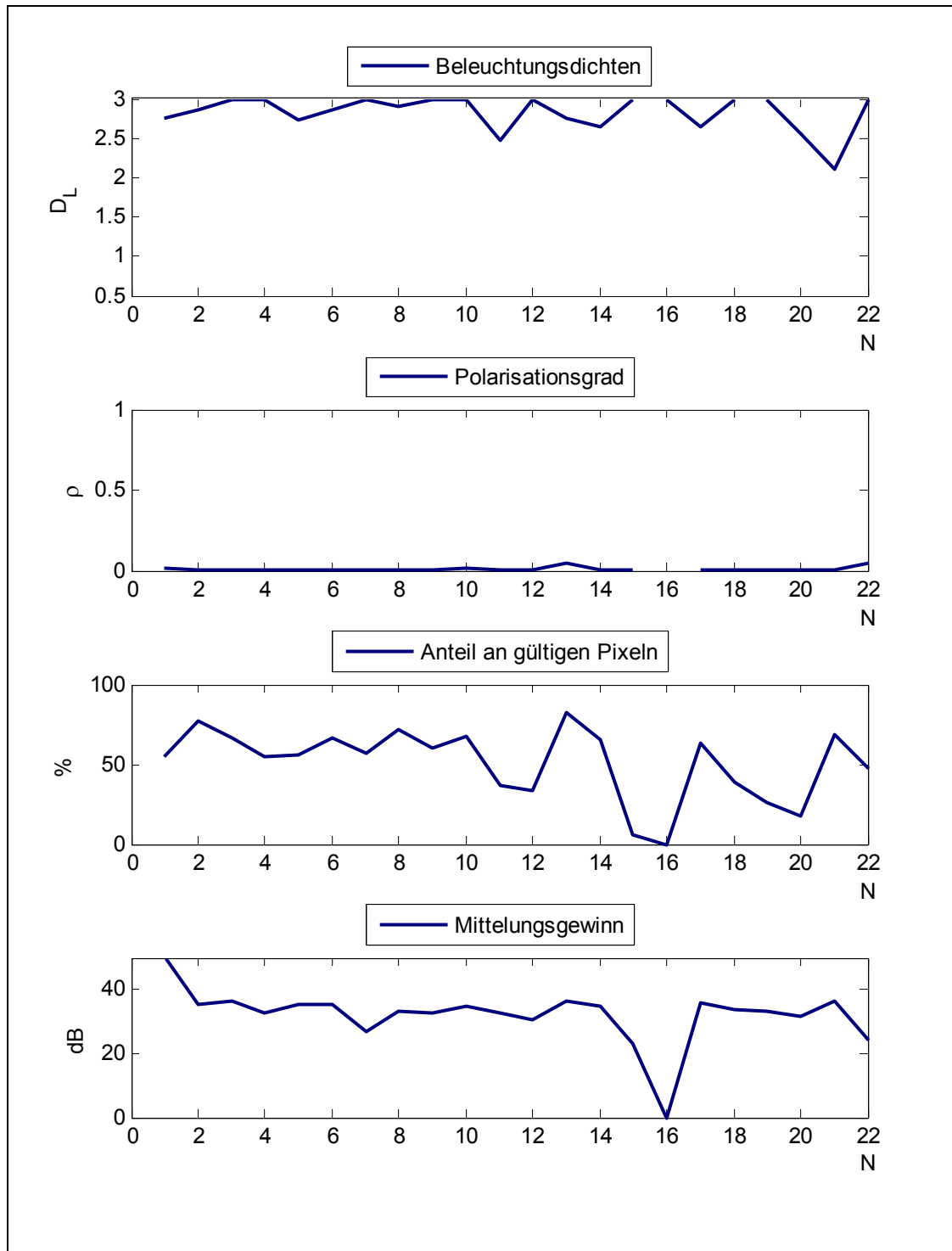
Es folgt die verwendete Aussteuerungsvariante:

N-1	Messung N an der Graukarte ermittelt und 2 Blendenstufen unterbelichtet
N+1,5	Messung N an der Graukarte ermittelt und 3 Blendenstufen überbelichtet
Reflex	Messung am hellsten Reflex der Szene

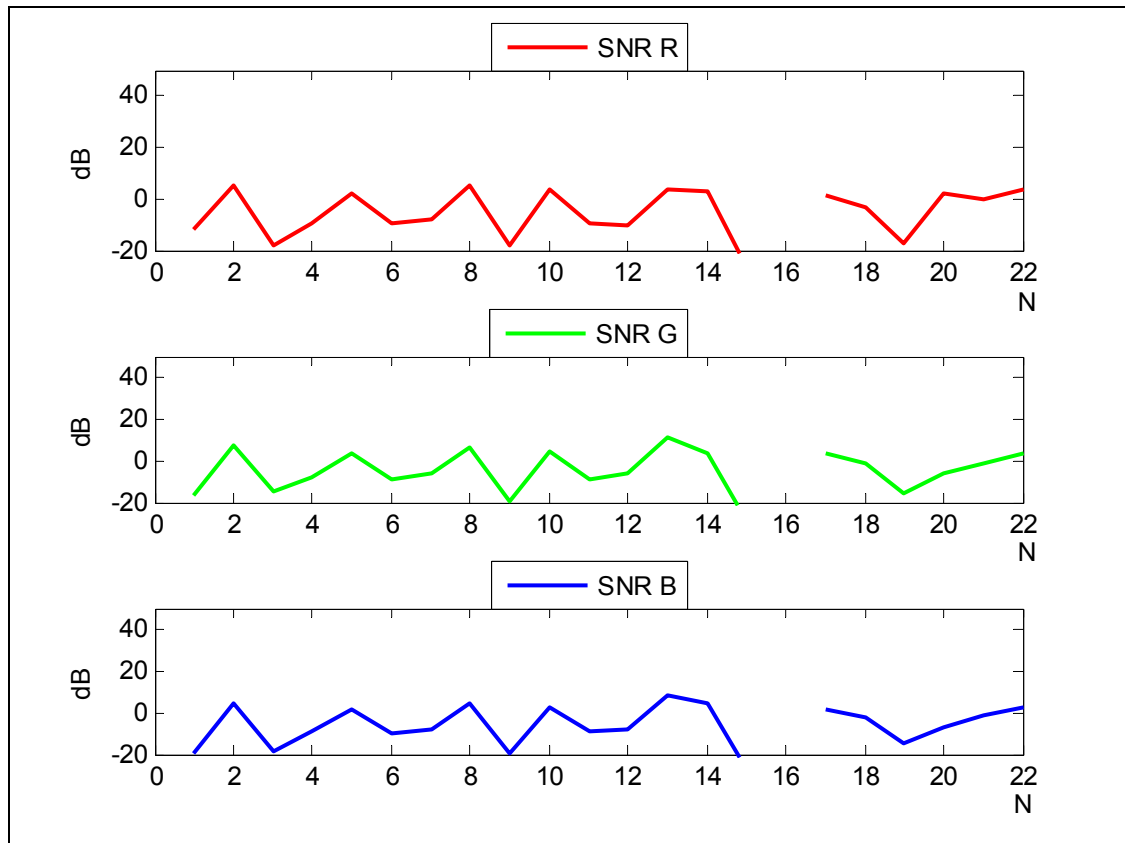
Zuletzt werden Dateinamen des entsprechenden Bildpaares aufgeführt. Besonderheiten, wie zum Beispiel Schwenk der Objektebene werden separat beschrieben.

Zu jedem Bildpaar gehören drei Grafiken. Die erste beinhaltet die Darstellung der Beleuchtungsdichten, des Polarisationsgrades, des Anteils an gültigen Pixeln und den Mittelungsgewinn. In der zweiten Grafik ist das Signal-Rausch-Verhältnis der einzelnen Farbkanäle dargestellt. Und zuletzt folgt die Darstellung der ermittelten Lichtfarben.

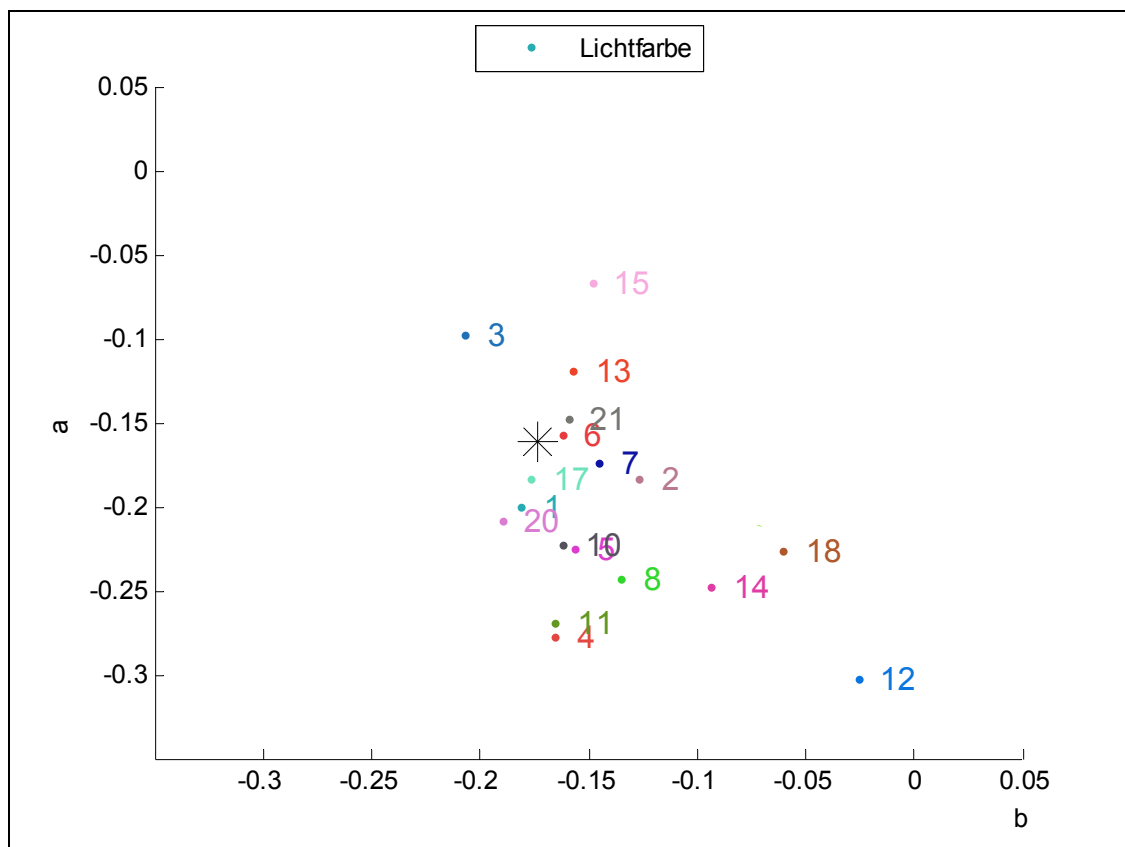
Position 1 N-1 3696_3698



Grafik 28: 3696_3698

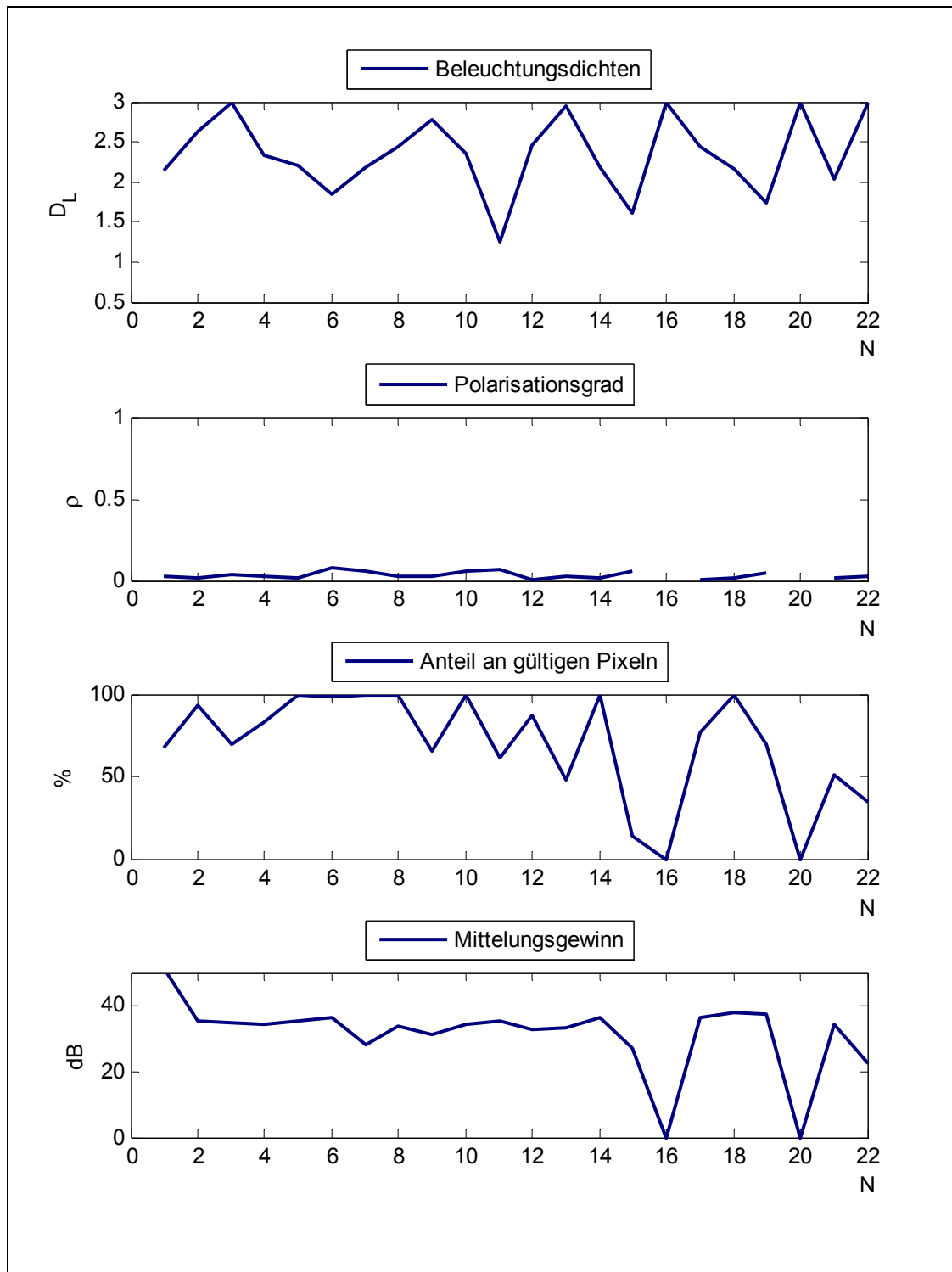


Grafik 29: SNR 3696_3698

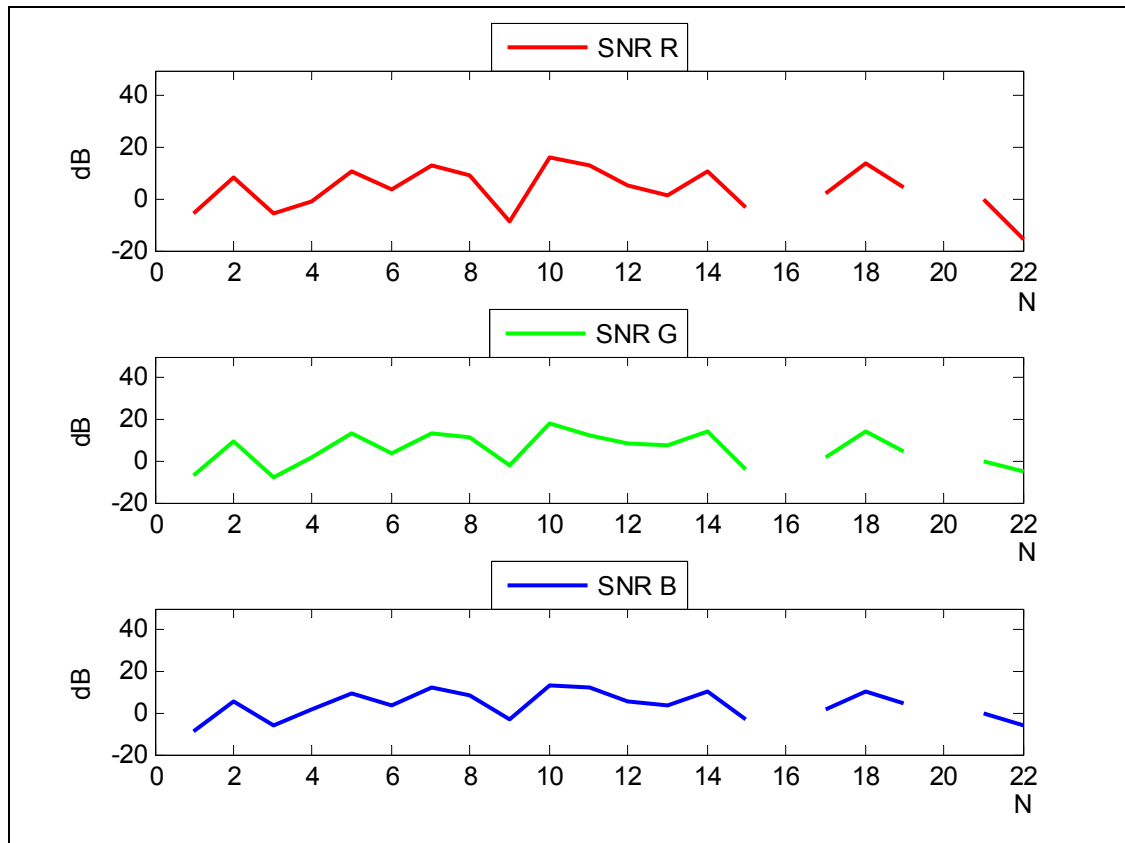


Grafik 30: Lichtfarbe 3696_3698

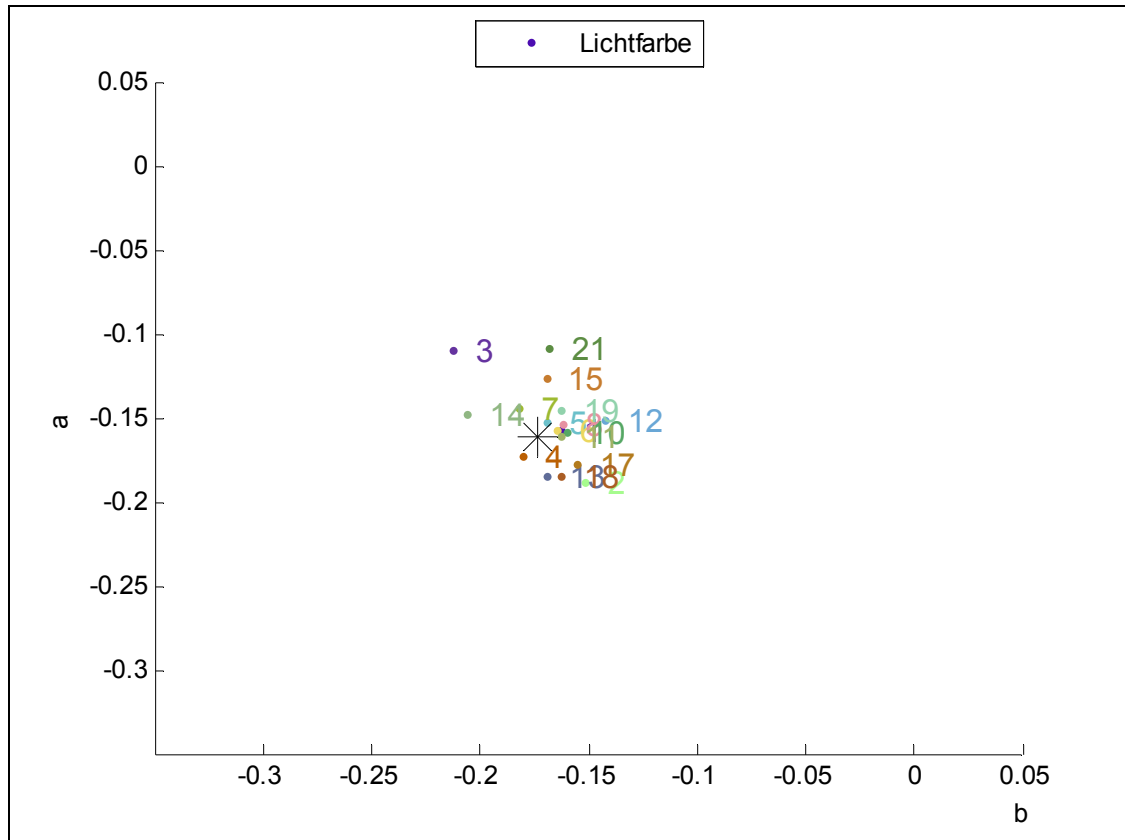
Position 2 N-1 3724_3726



Grafik 31: 3724_3726

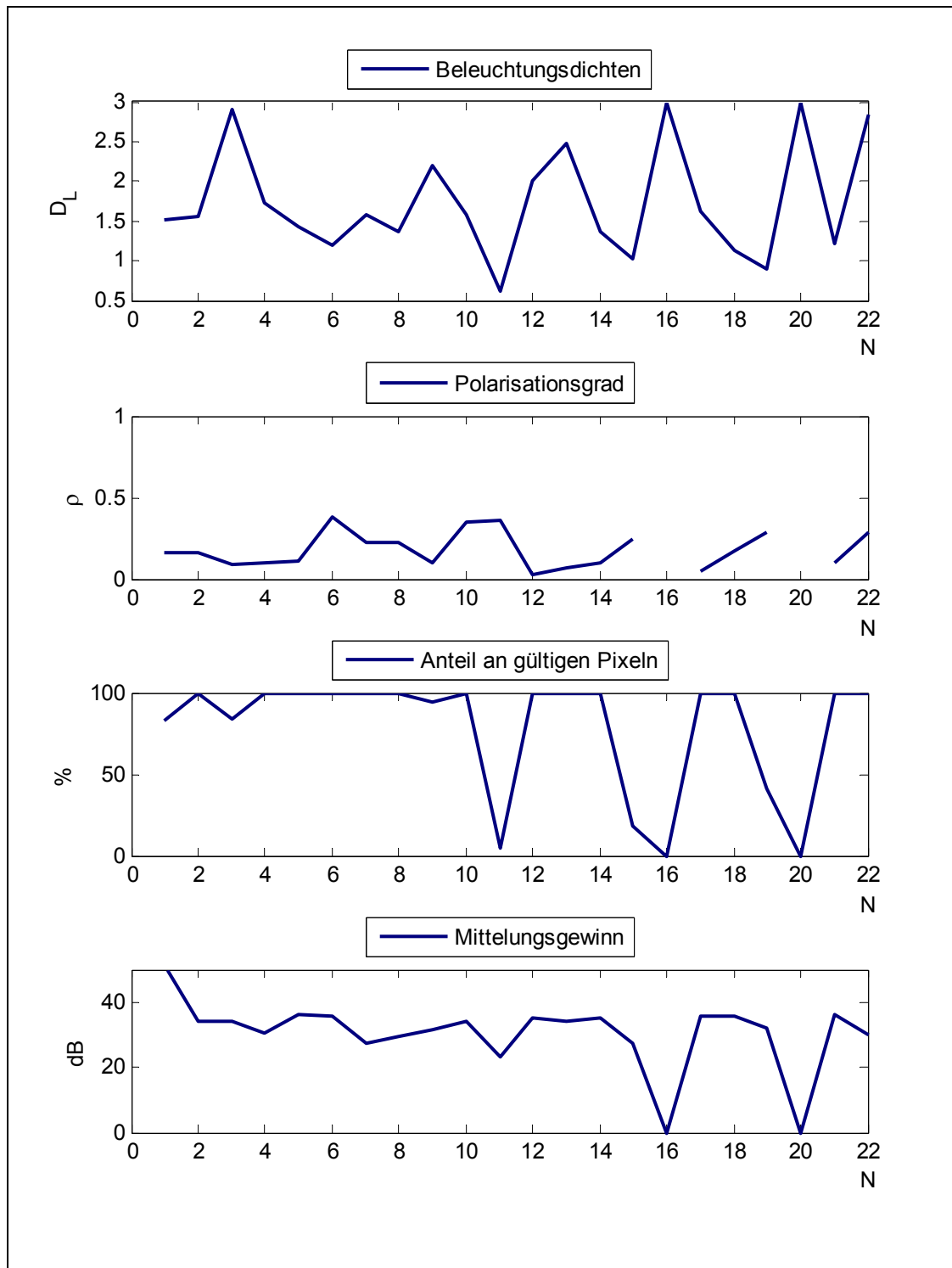


Grafik 32: SNR 3724_3726

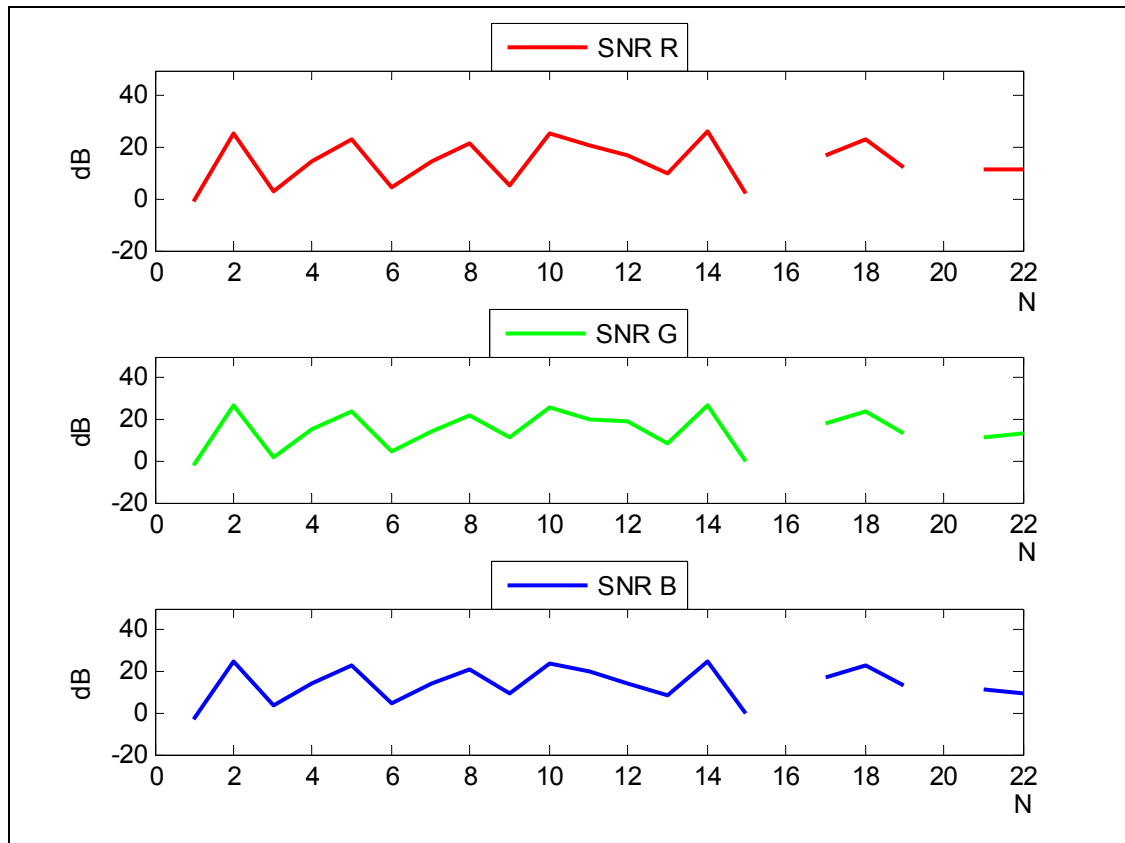


Grafik 33: Lichtfarbe 3724_3726

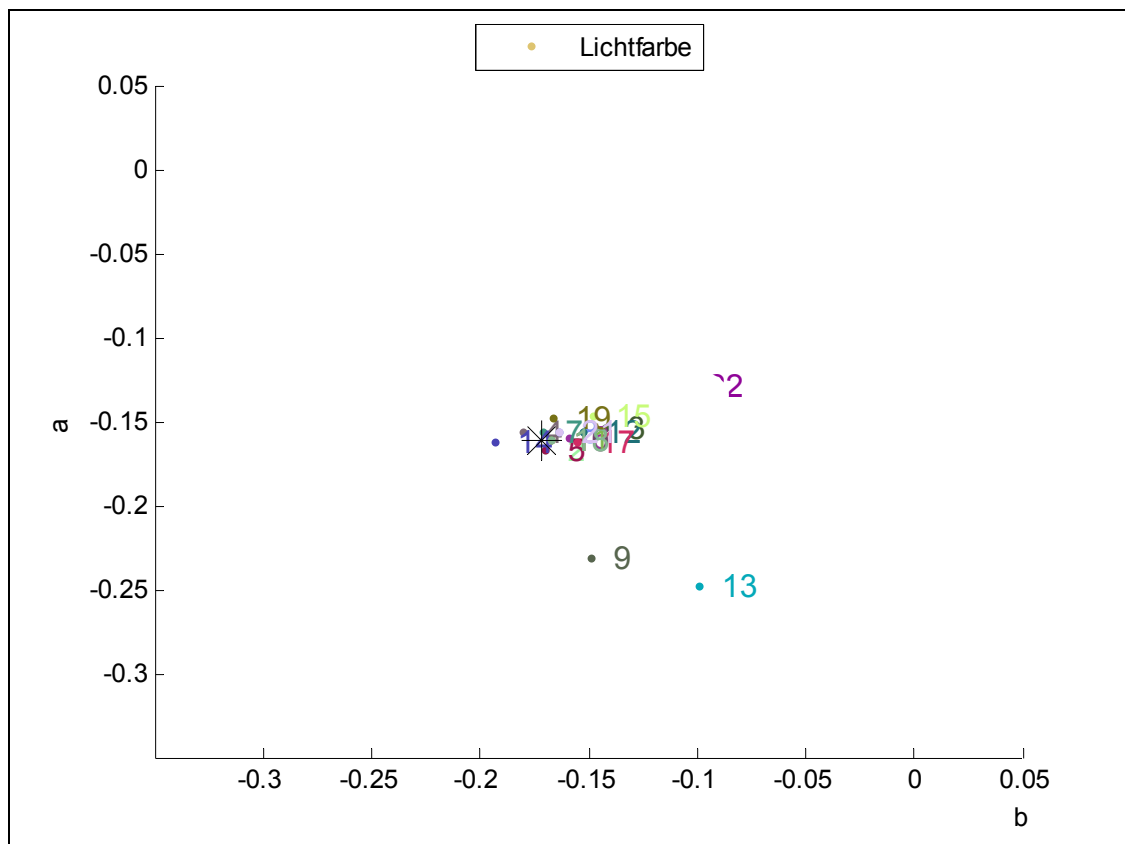
Position 3 N-1 3751_3753



Grafik 34: 3751_3753

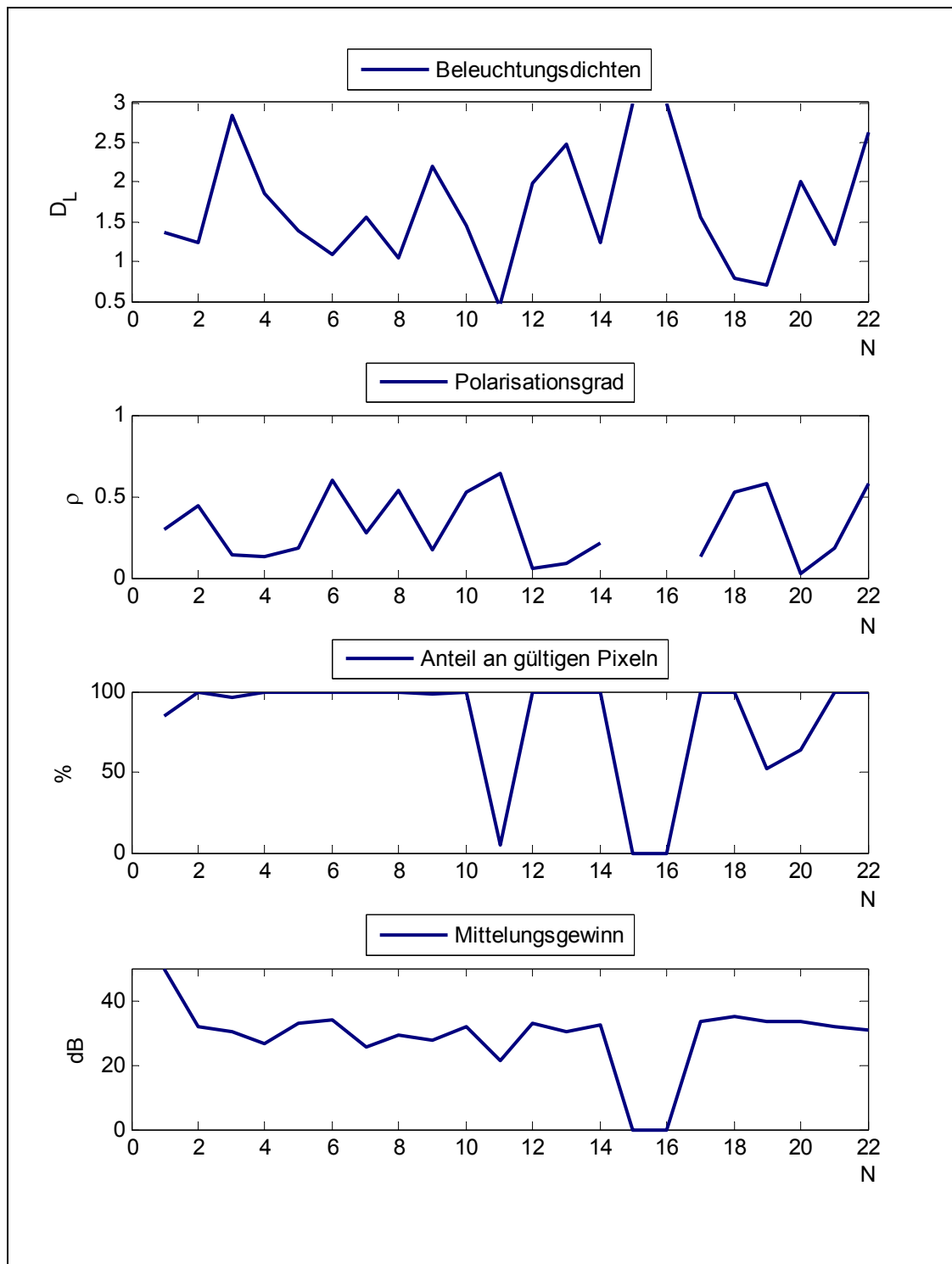


Grafik 35: SNR 3751_3753

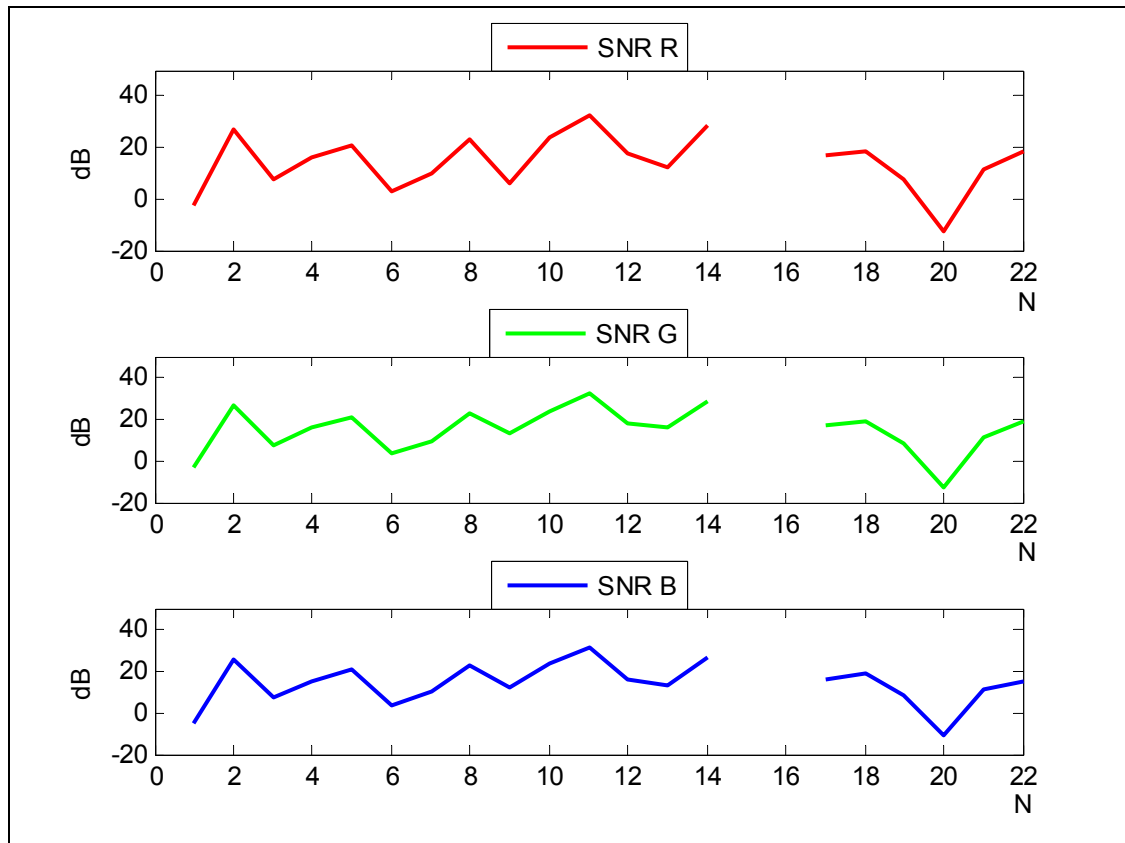


Grafik 36: Lichtfarbe 3751_3753

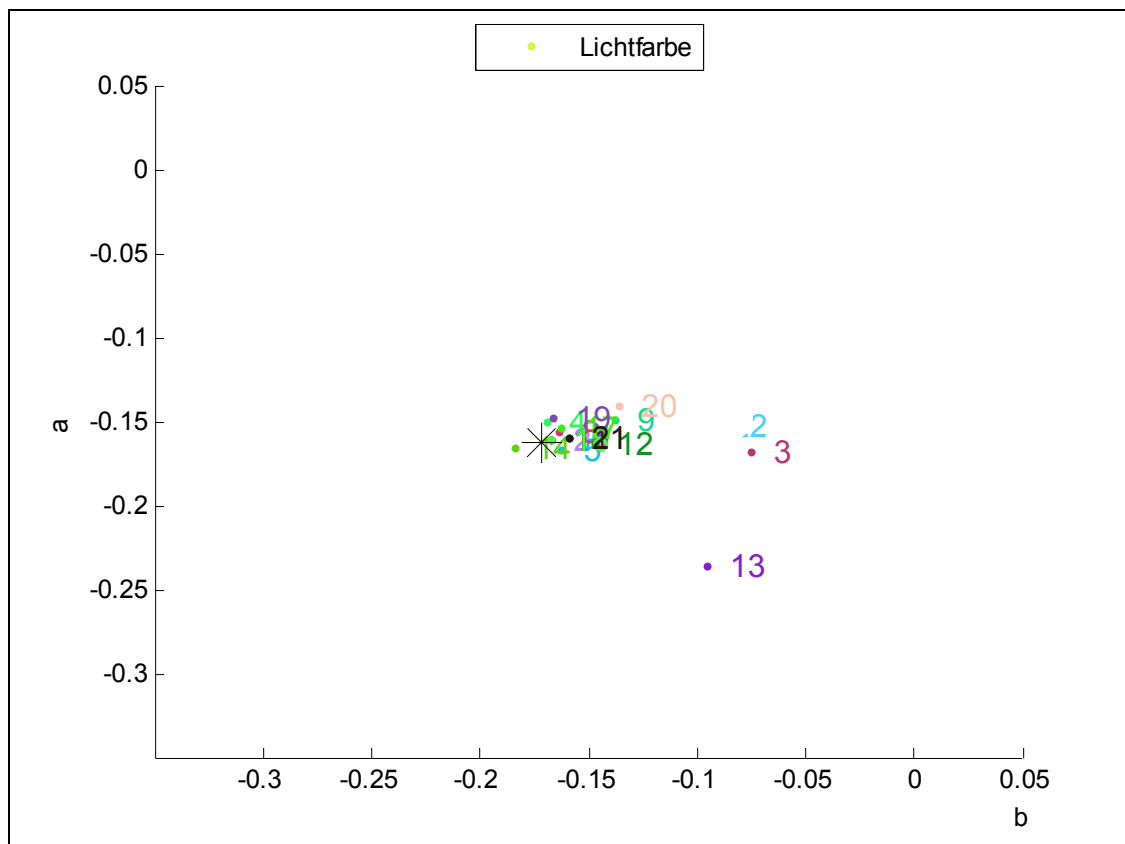
Position 4 N-1 3773_3775



Grafik 37: 3773_3775

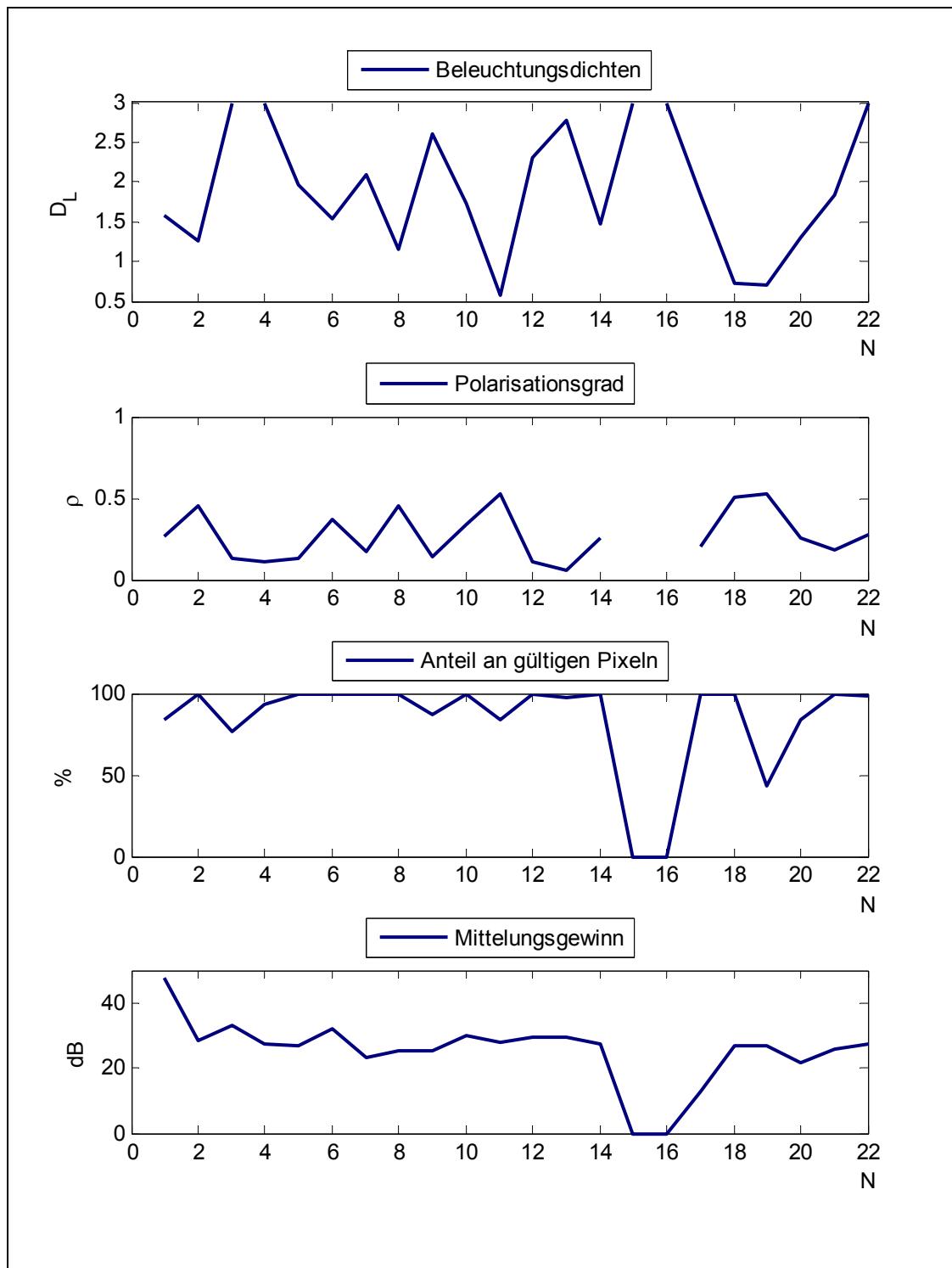


Grafik 38: SNR 3773_3775

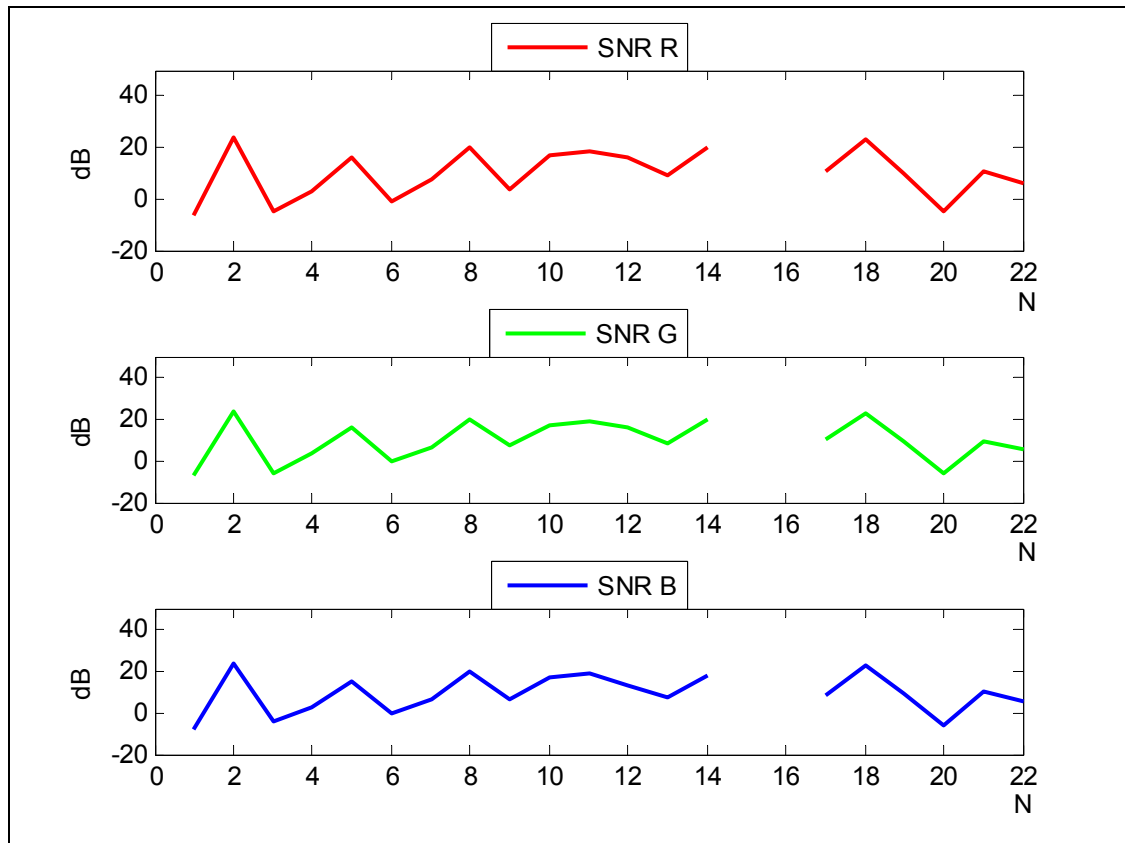


Grafik 39: Lichtfarbe 3773_3775

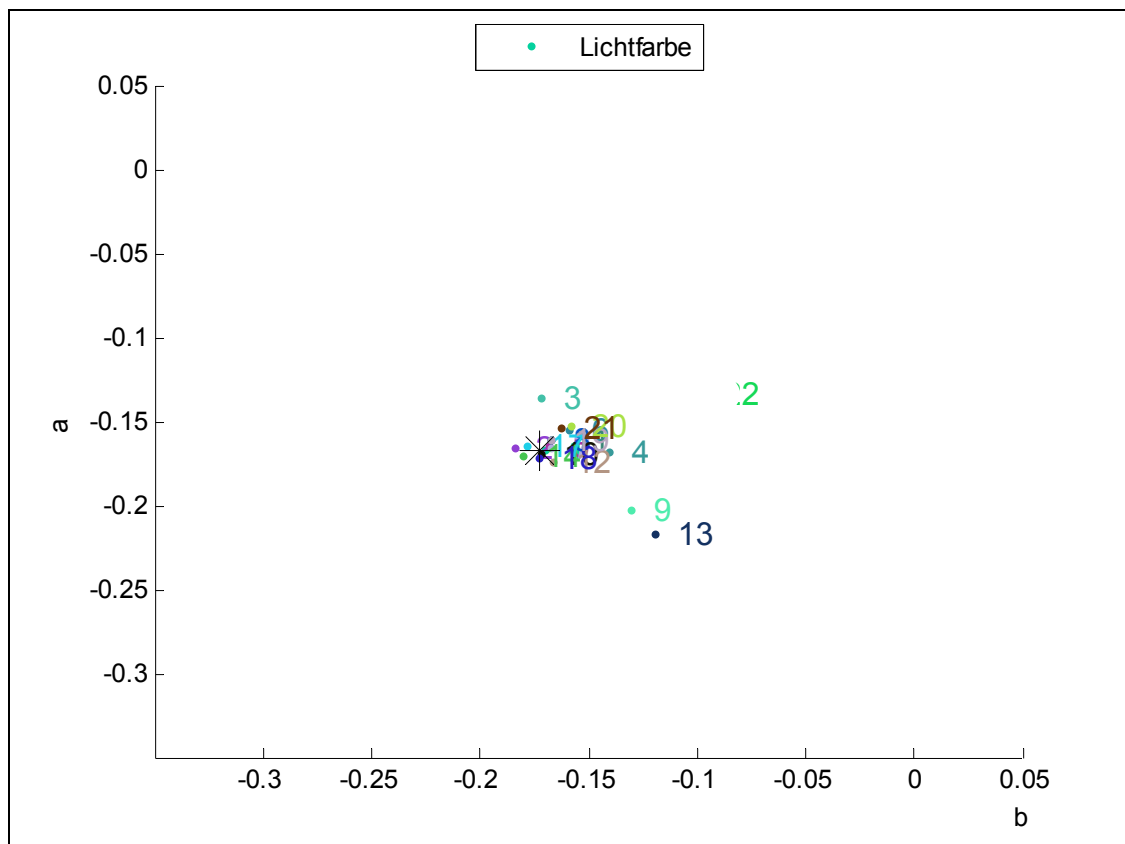
Position 5 N-1 3789_3791



Grafik 40: 3789_3791

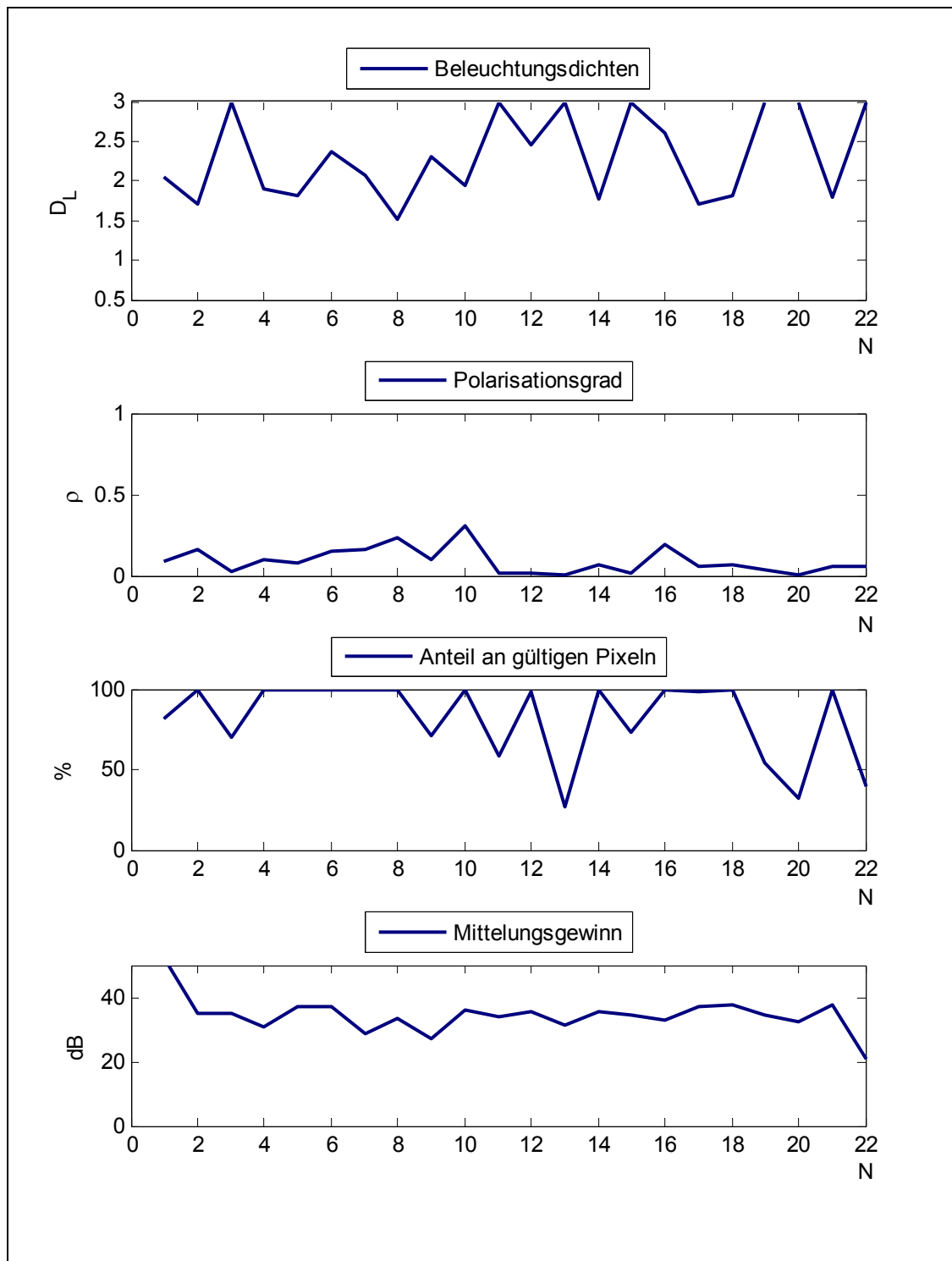


Grafik 41: SNR 3789_3791

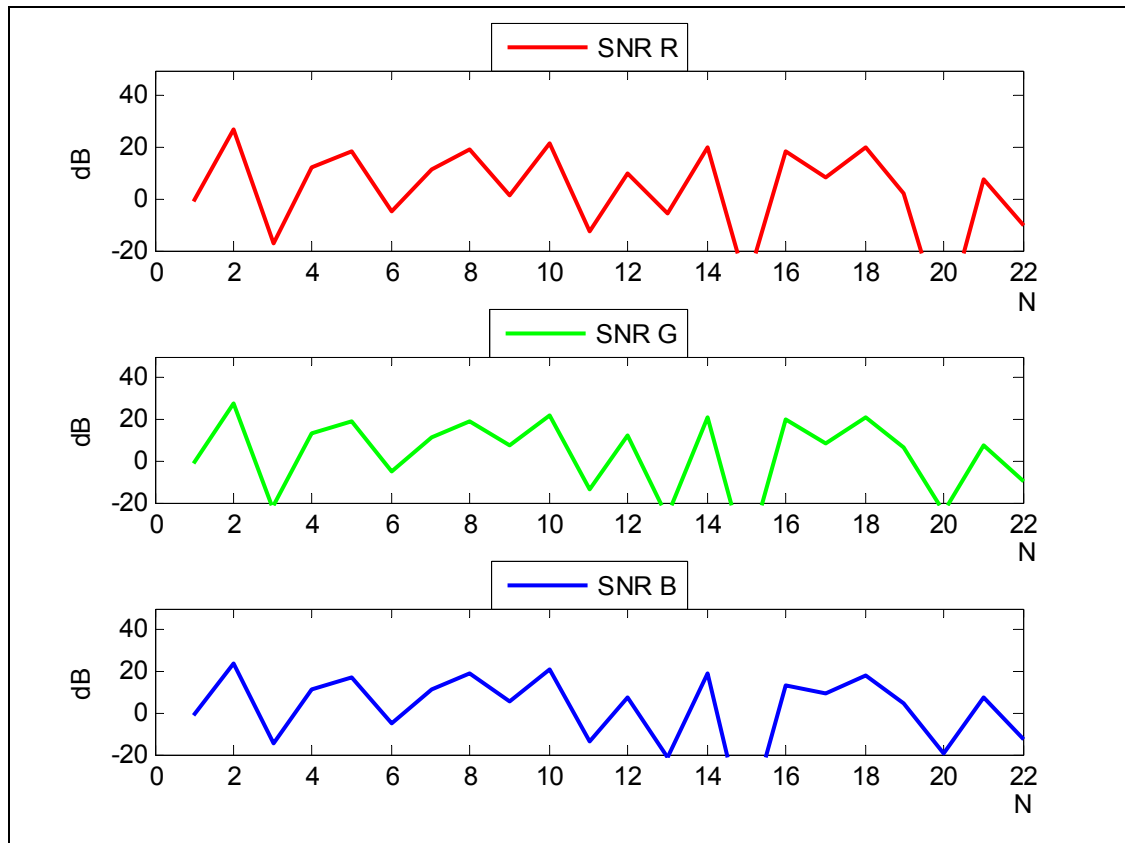


Grafik 42: Lichtfarbe 3789_3791

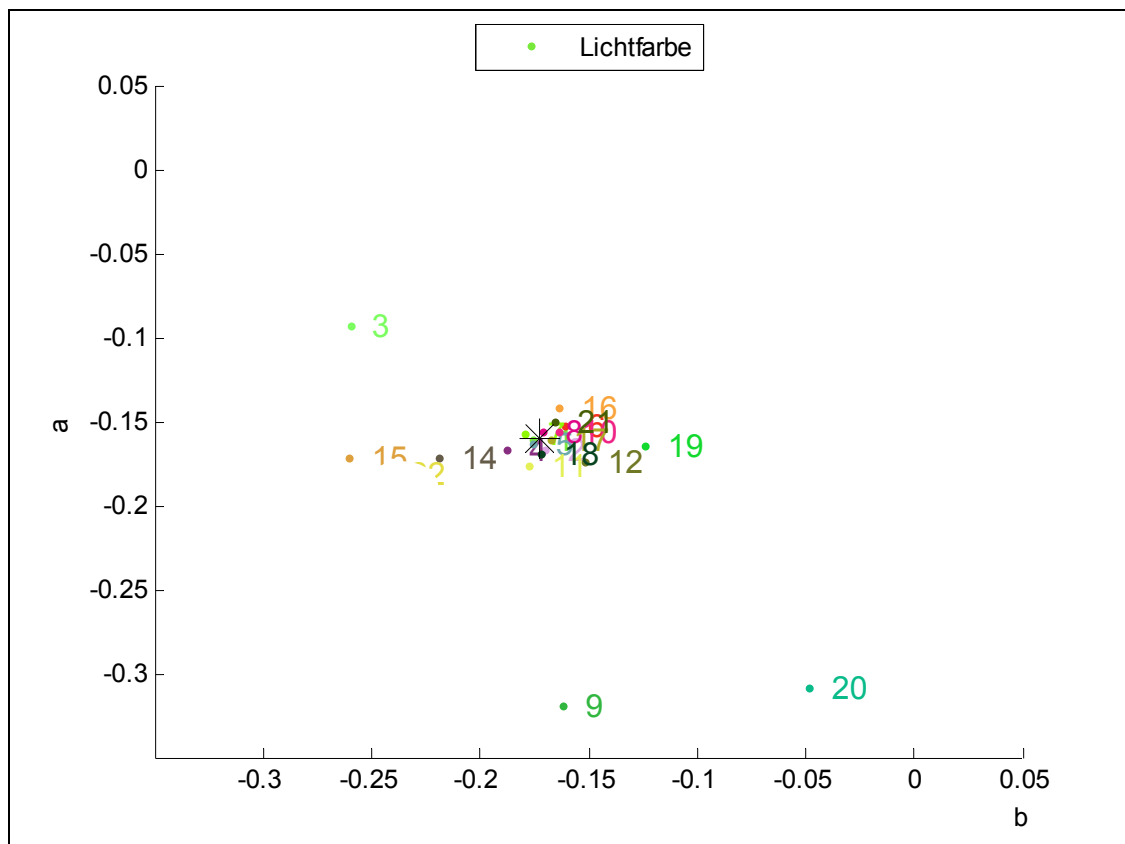
Position 3 N-1 3757_3759 Schwenk senkrecht auf 6



Grafik 43: 3757_3759

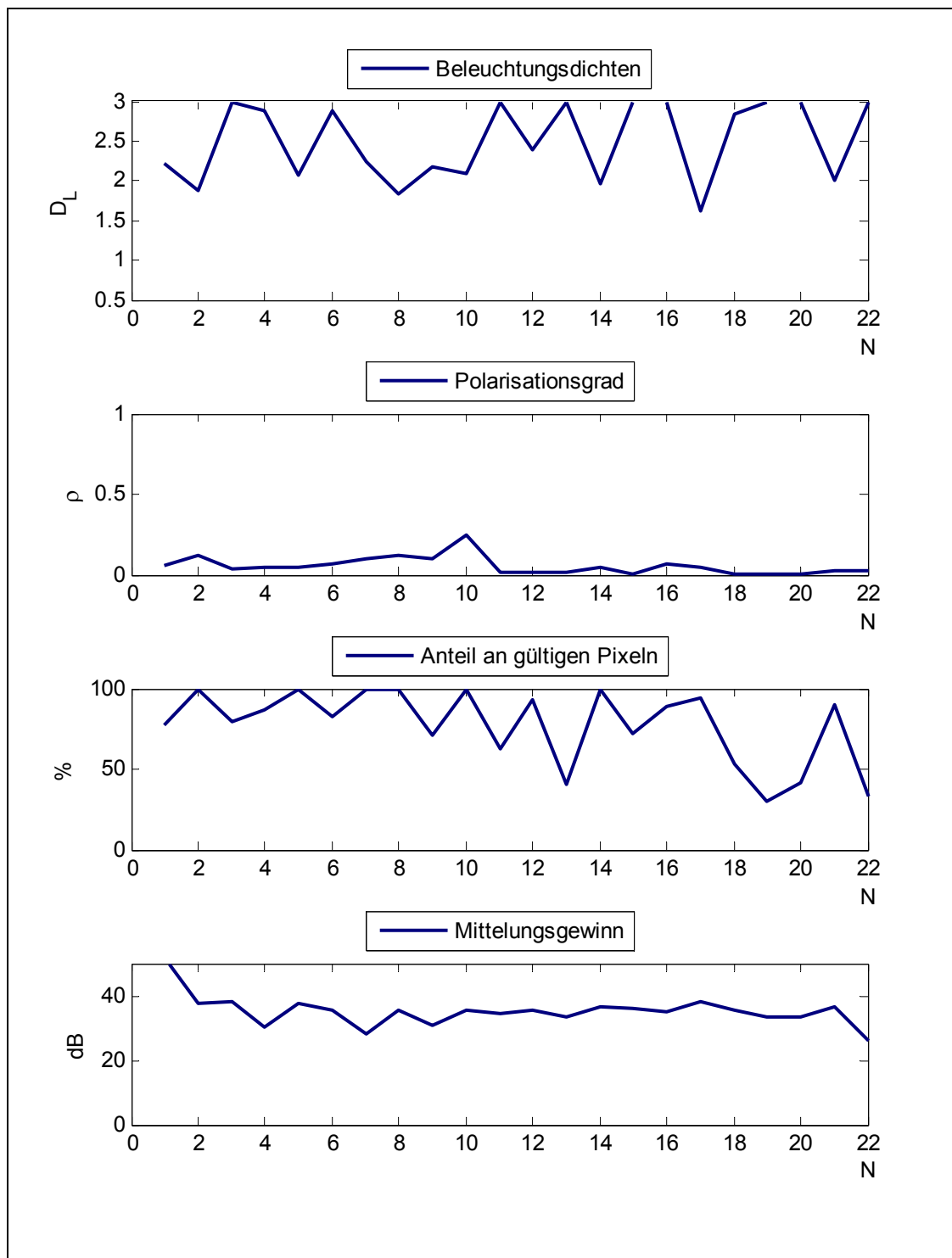


Grafik 44: SNR 3757_3759

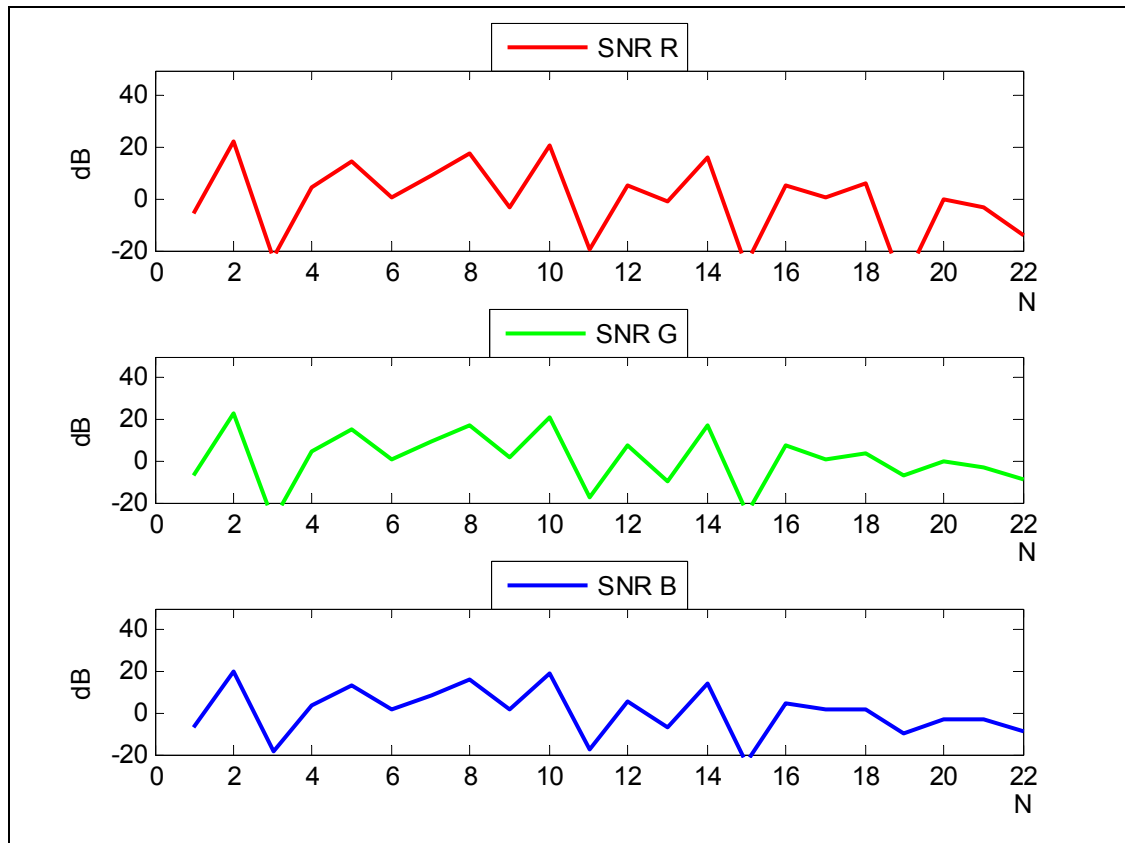


Grafik 45: Lichtfarbe 3757_3759

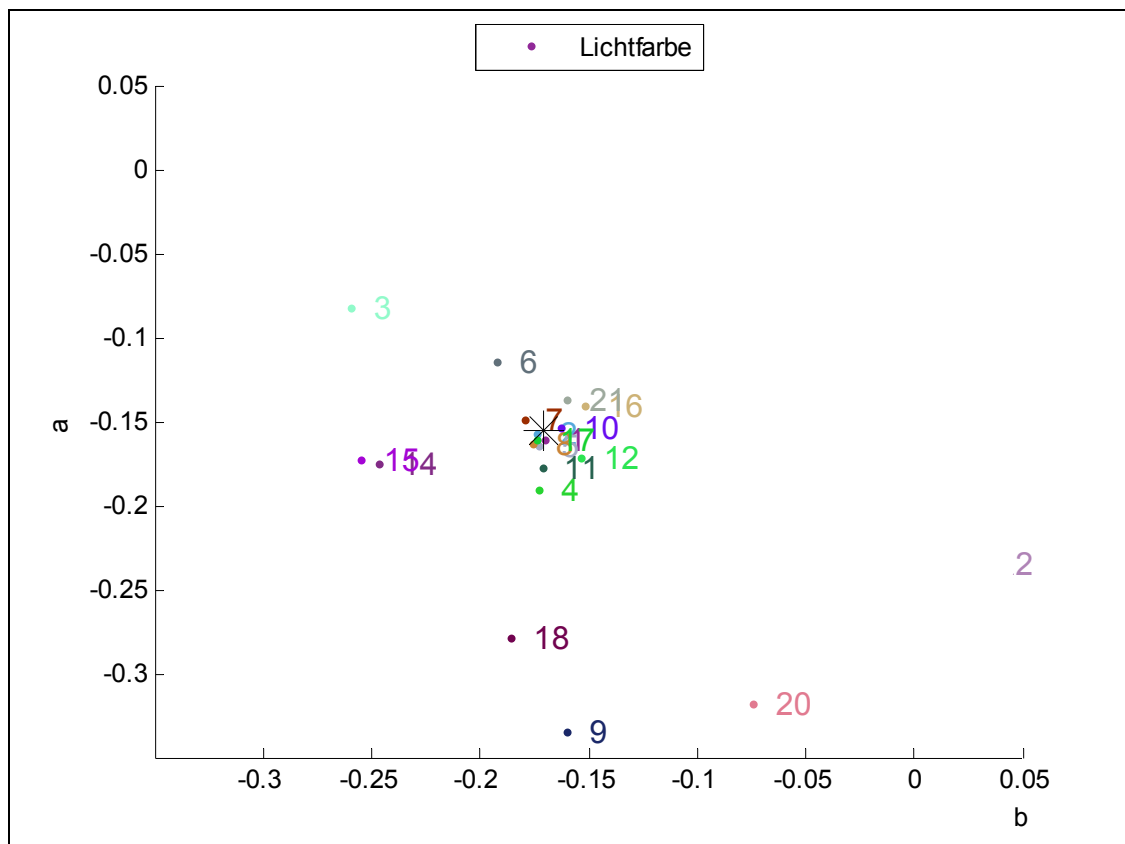
Position 3 N-1 3764_3766 Schwenk senkrecht auf 7



Grafik 46: 3764_3766

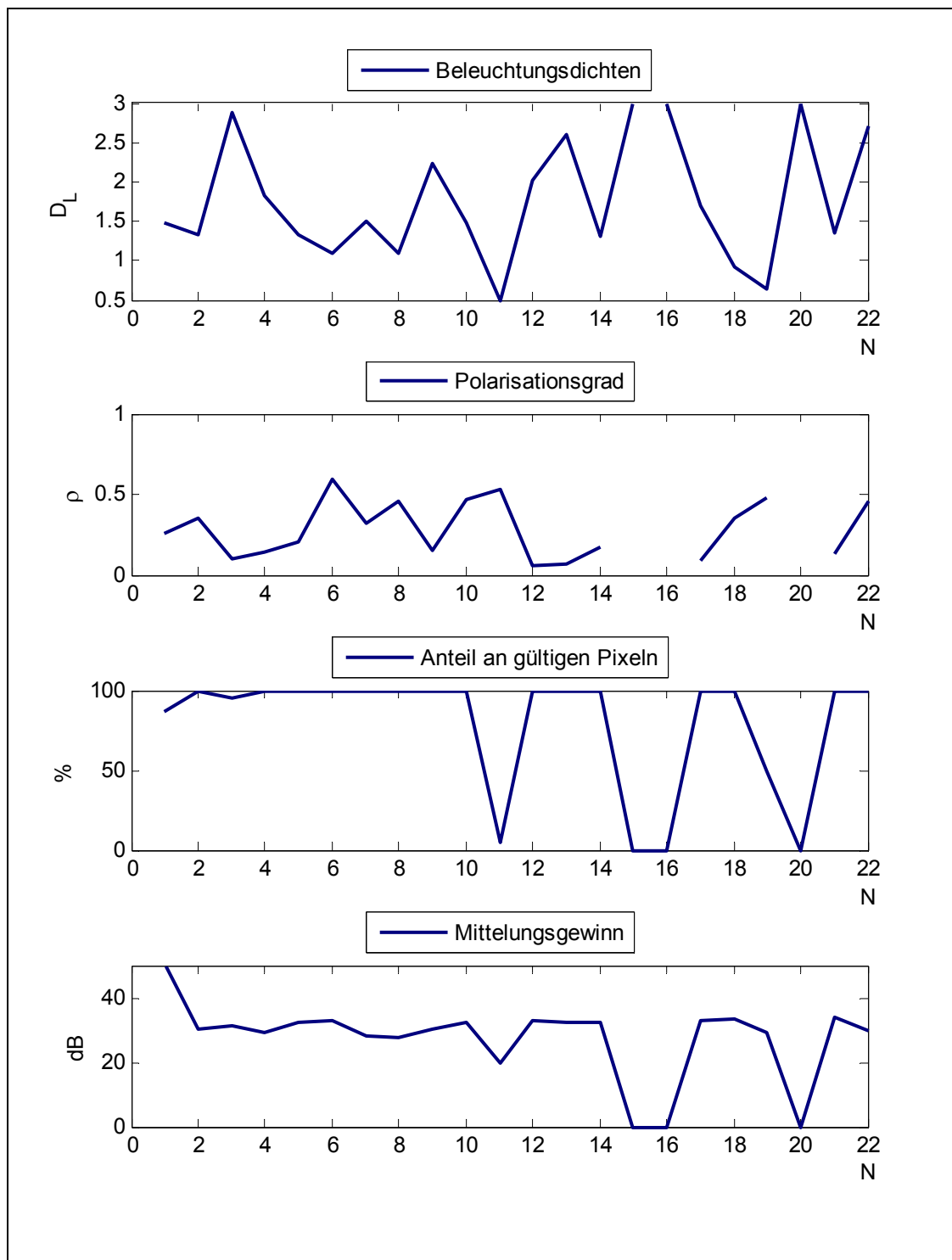


Grafik 47: SNR 3764_3766

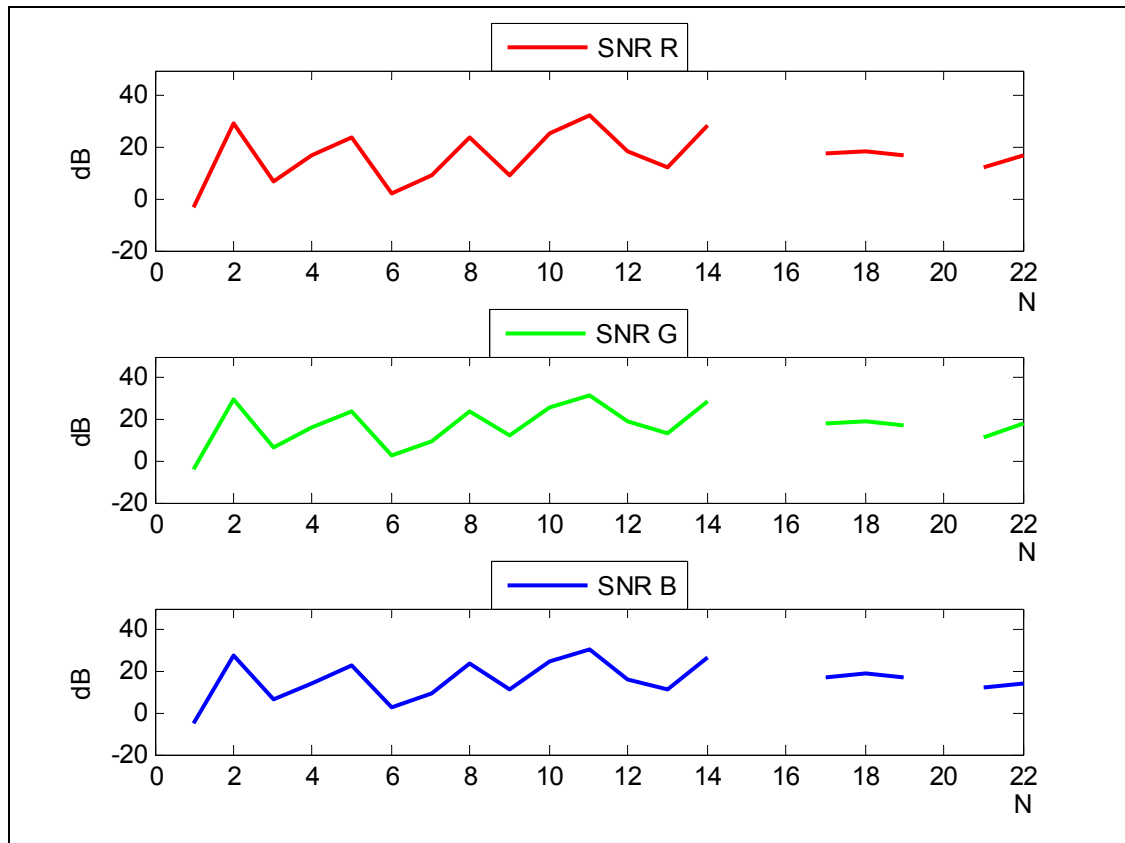


Grafik 48: Lichtfarbe 3764_3766

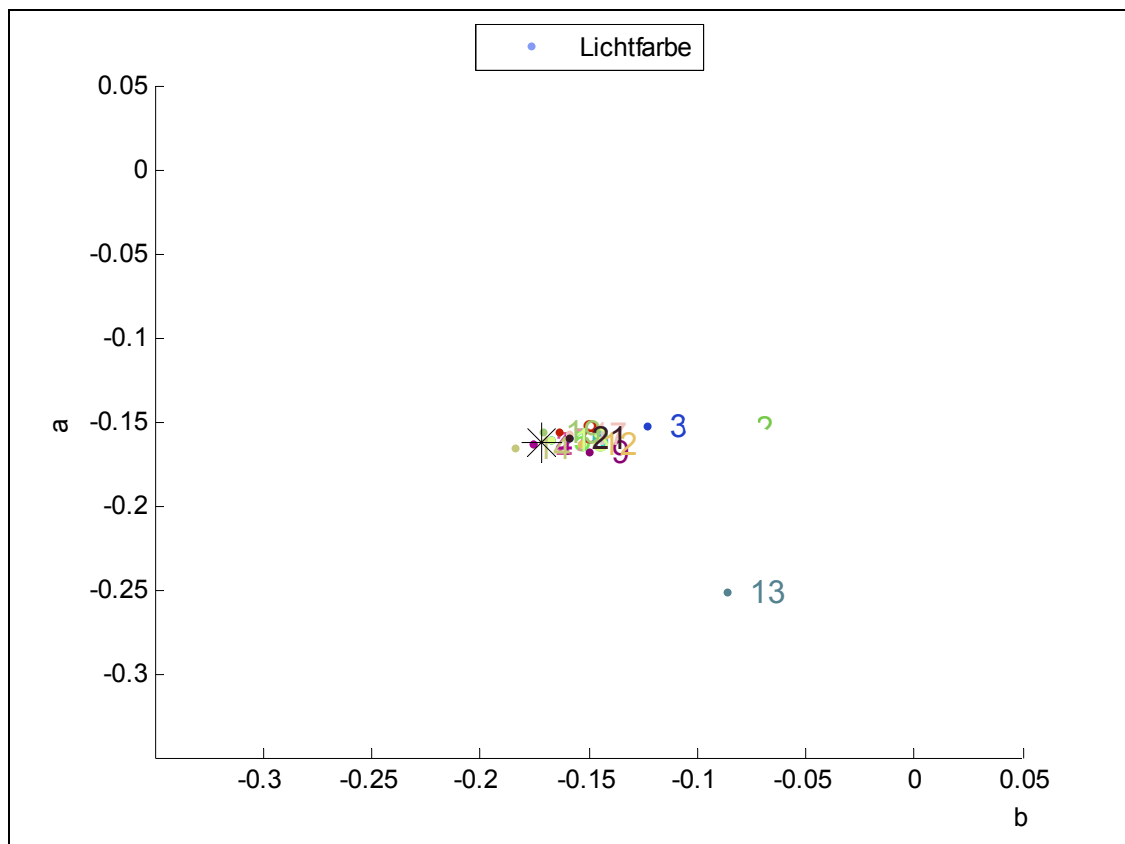
Position 4 N-1 3773_3774



Grafik 49: 3773_3774

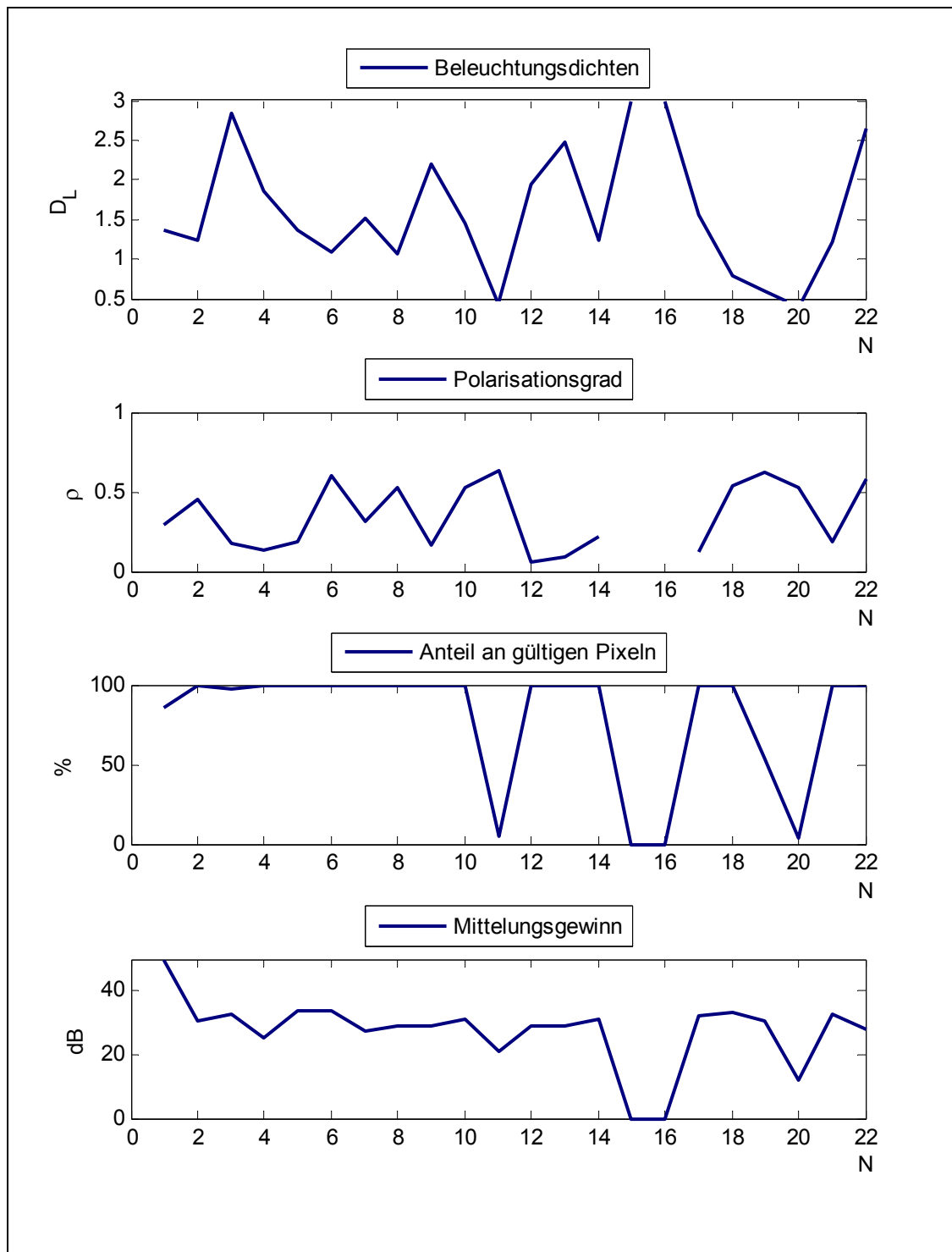


Grafik 50: SNR 3773_3774

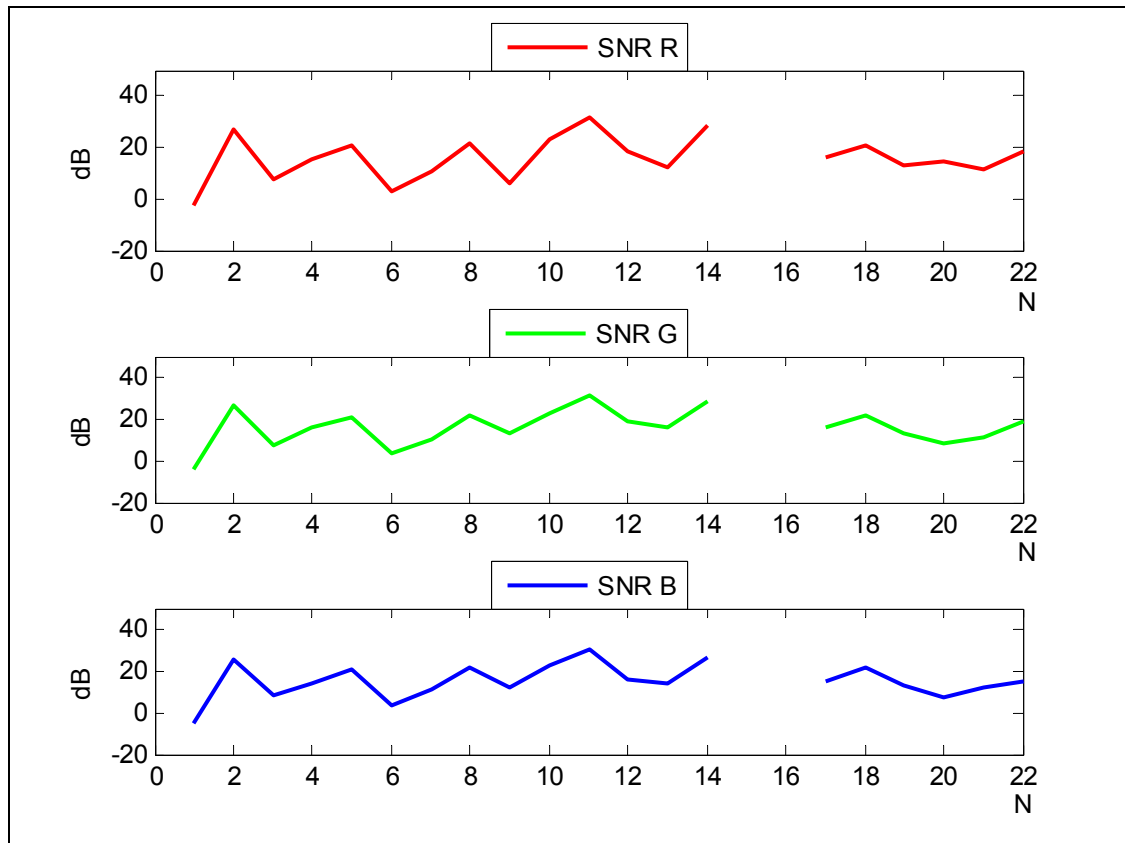


Grafik 51: Lichtfarbe 3773_3774

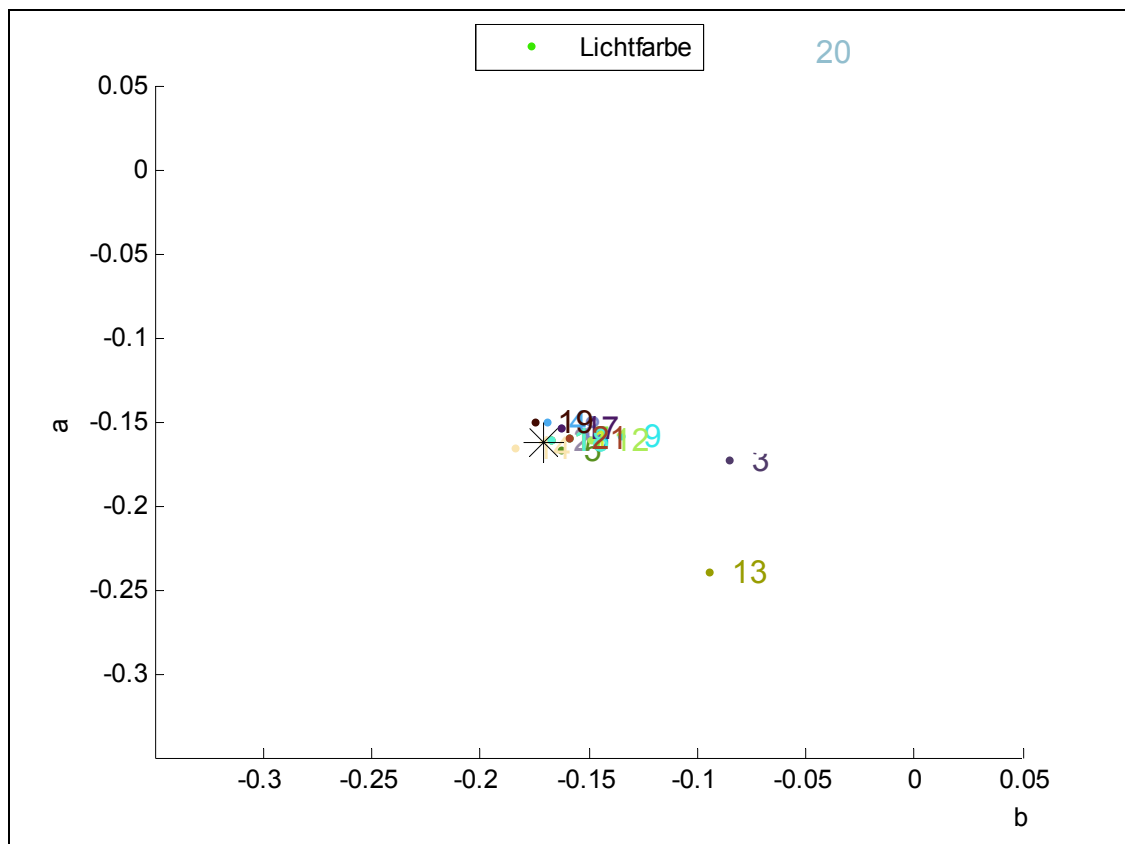
Position 4 N-1 3773_3775



Grafik 52: 3773_3775

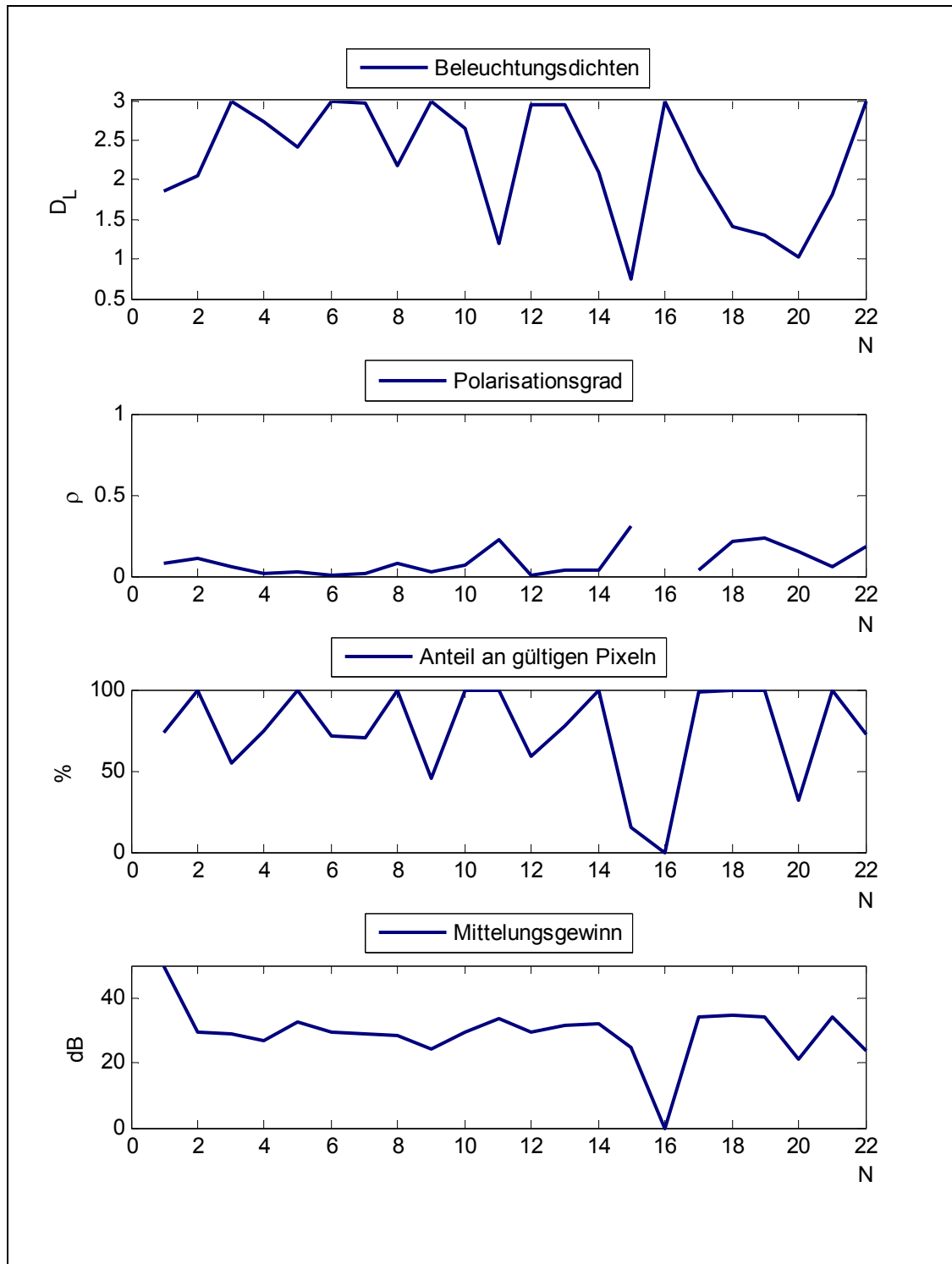


Grafik 53: SNR 3773_3775

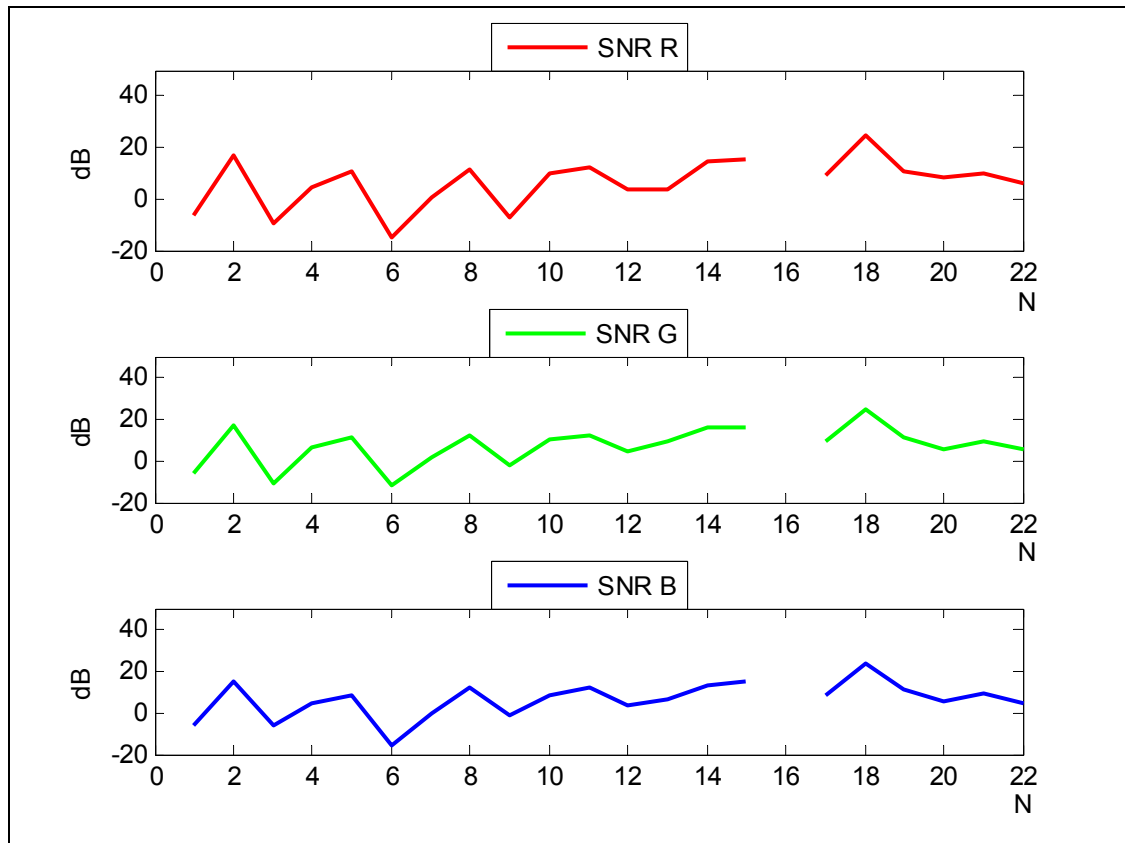


Grafik 54: Lichtfarbe 3773_3775

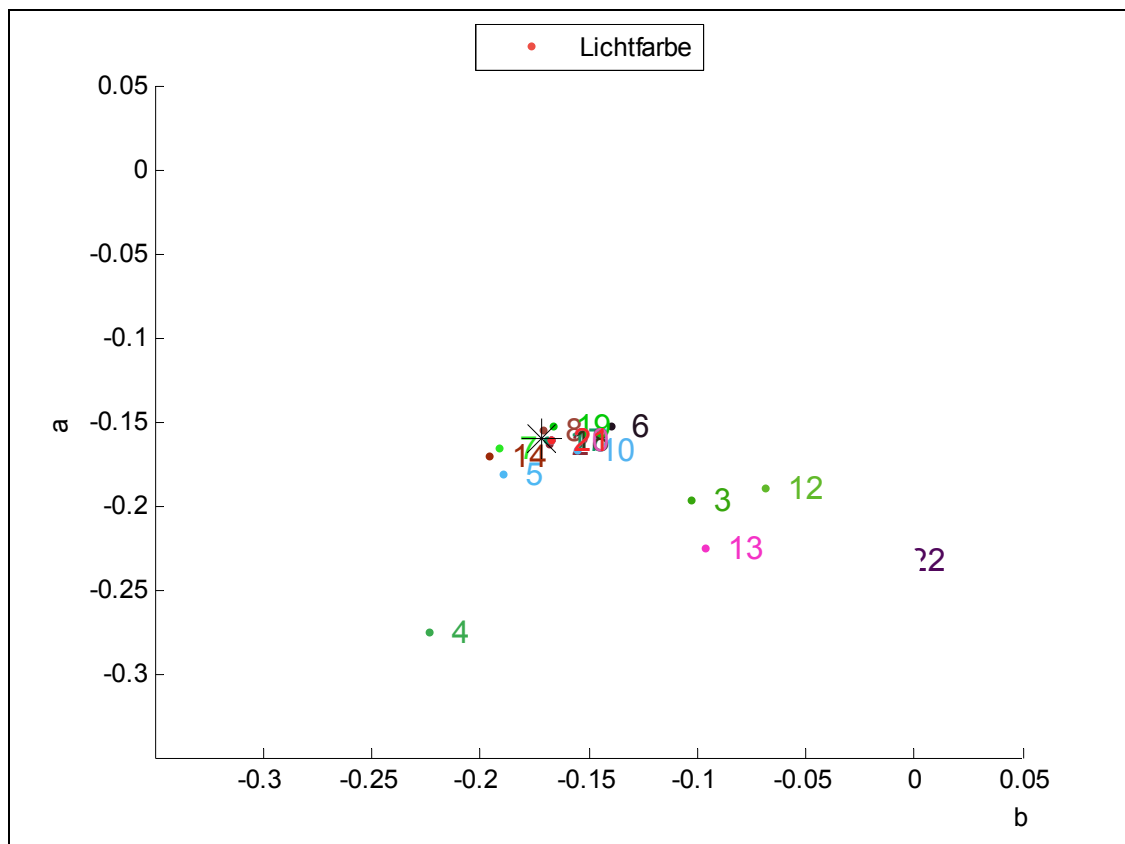
Position 4 N-1 3774_3775



Grafik 55: 3774_3775



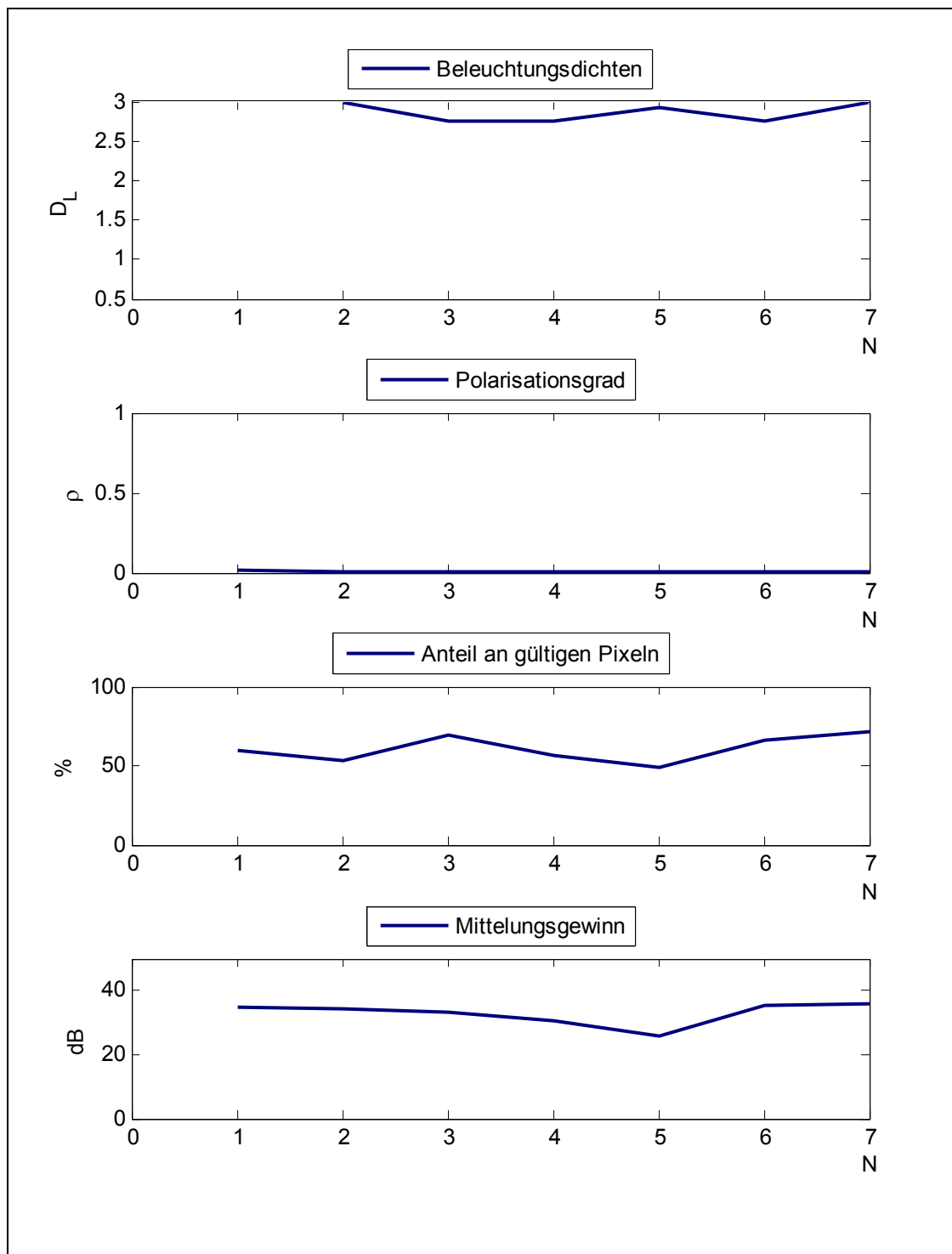
Grafik 56: 3774_3775



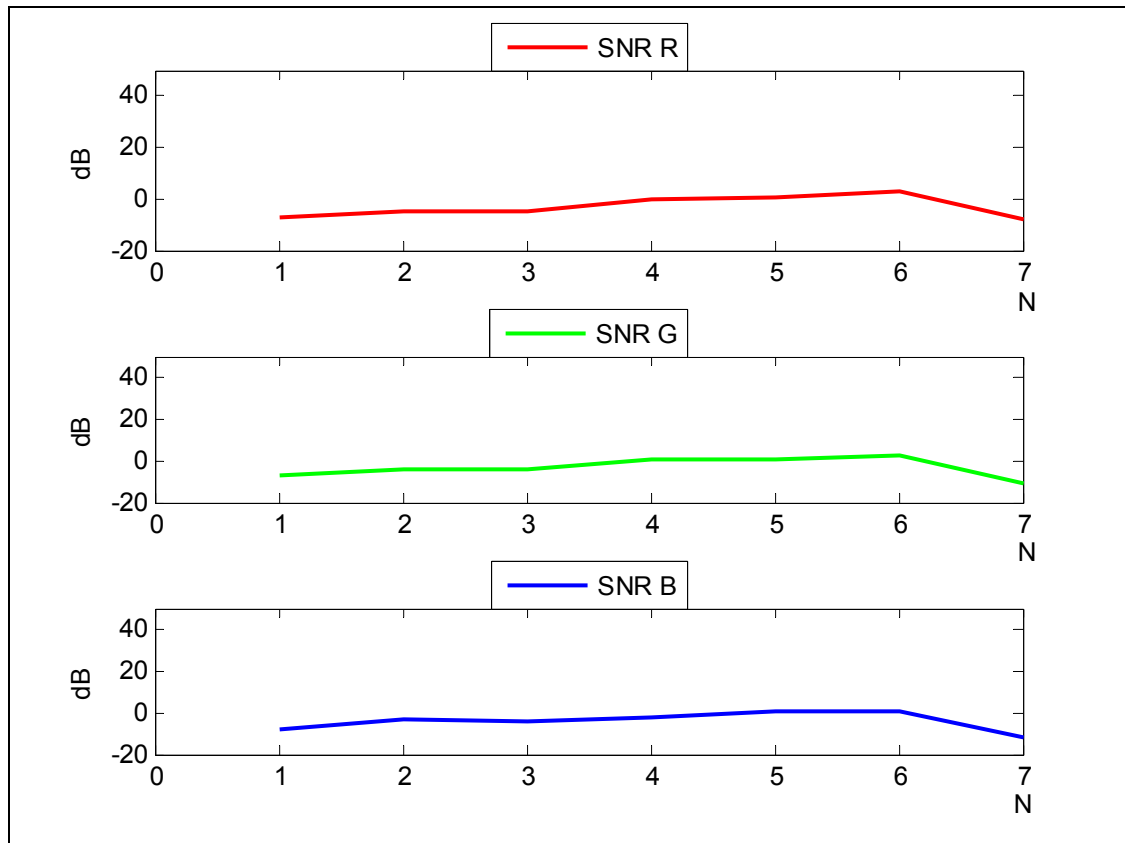
Grafik 57: Lichtfarbe 3774_3775

Position 1 Reflex 3693_3695

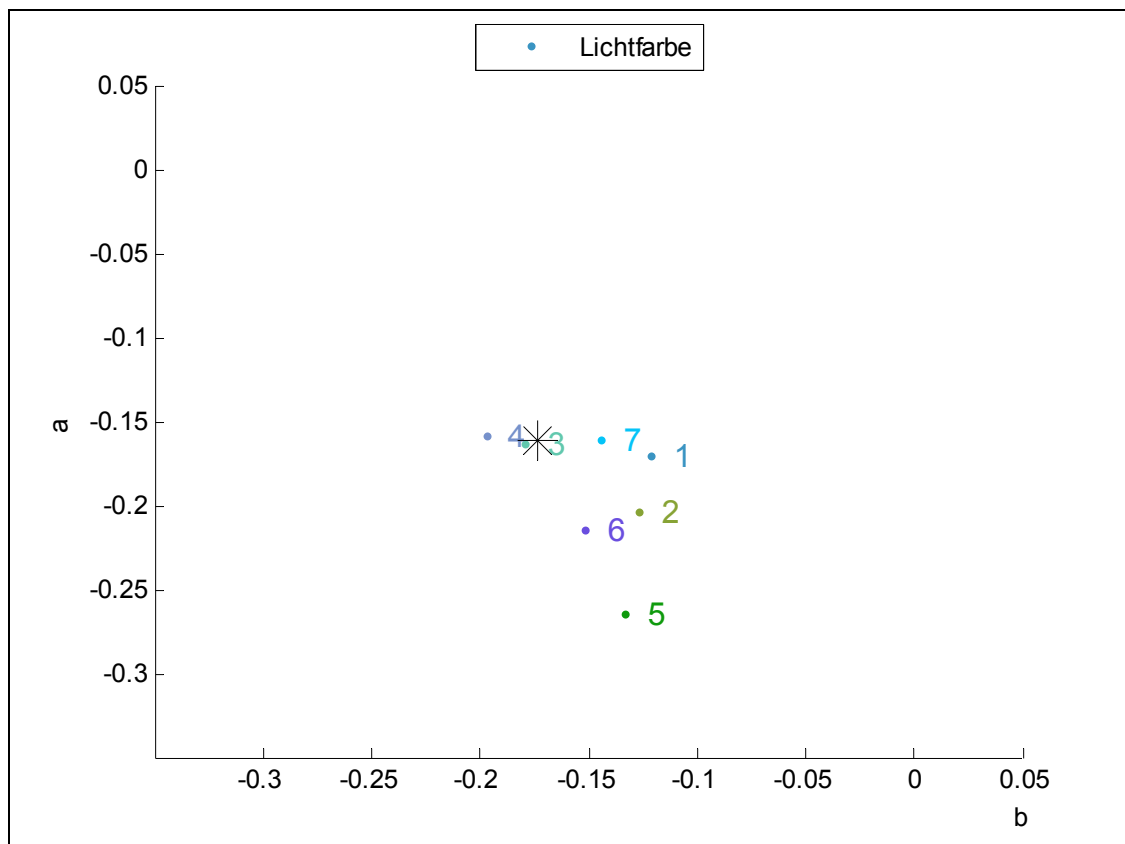
Es wurden nur 7 Messfelder für die Untersuchung der Reflexe an glatten Oberflächen ausgewählt: glattes Pflanzenblatt (1), Photo, matt (2), Photo, glänzend (3), Glas (4), Metallickachel (5), Keramikkachel (6), Styropor (7). Der Referenzort entspricht der Lichtfarbe auf der Graukarte Belichtung mit N-1.



Grafik 58: 3693_3695

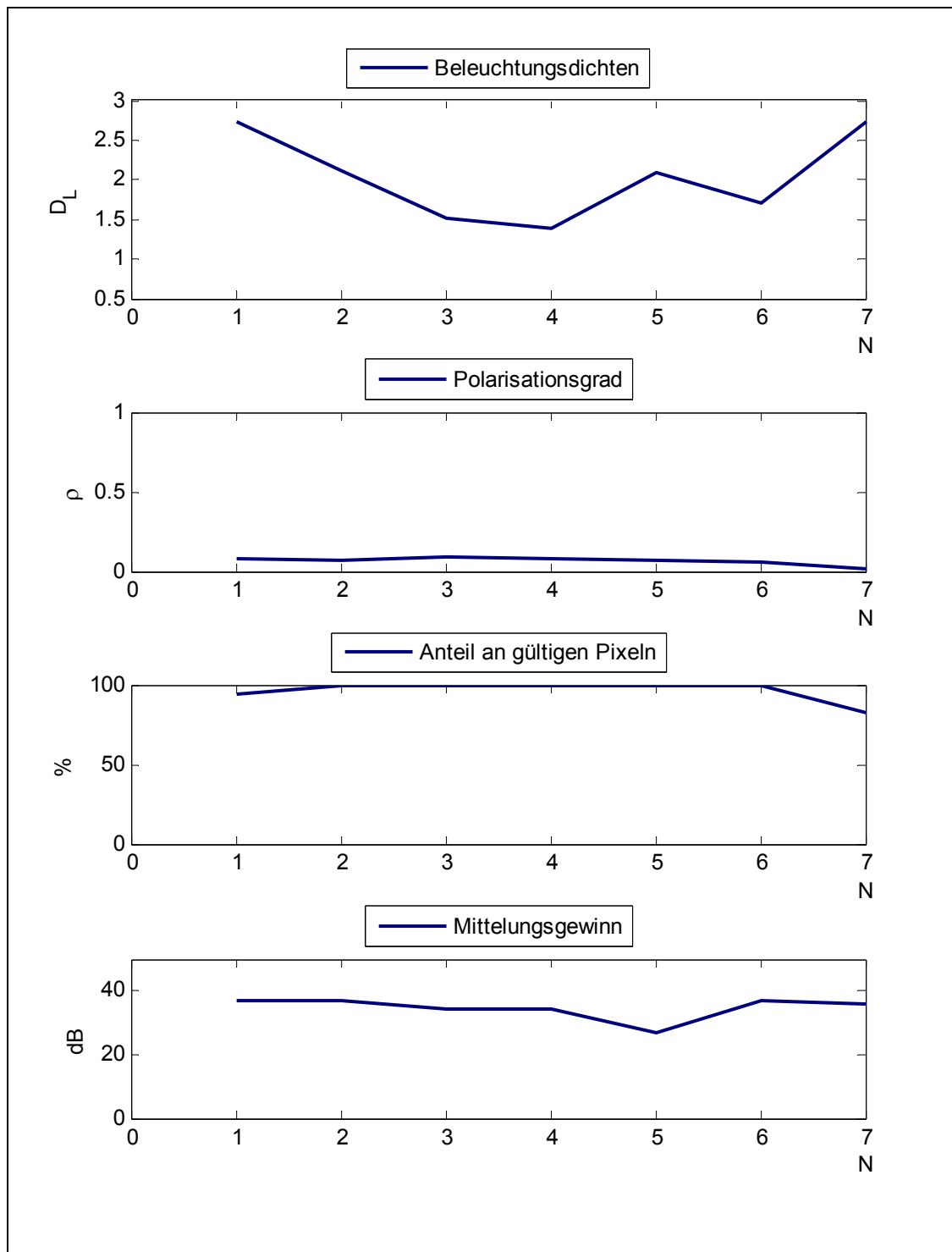


Grafik 59: SNR 3693_3695

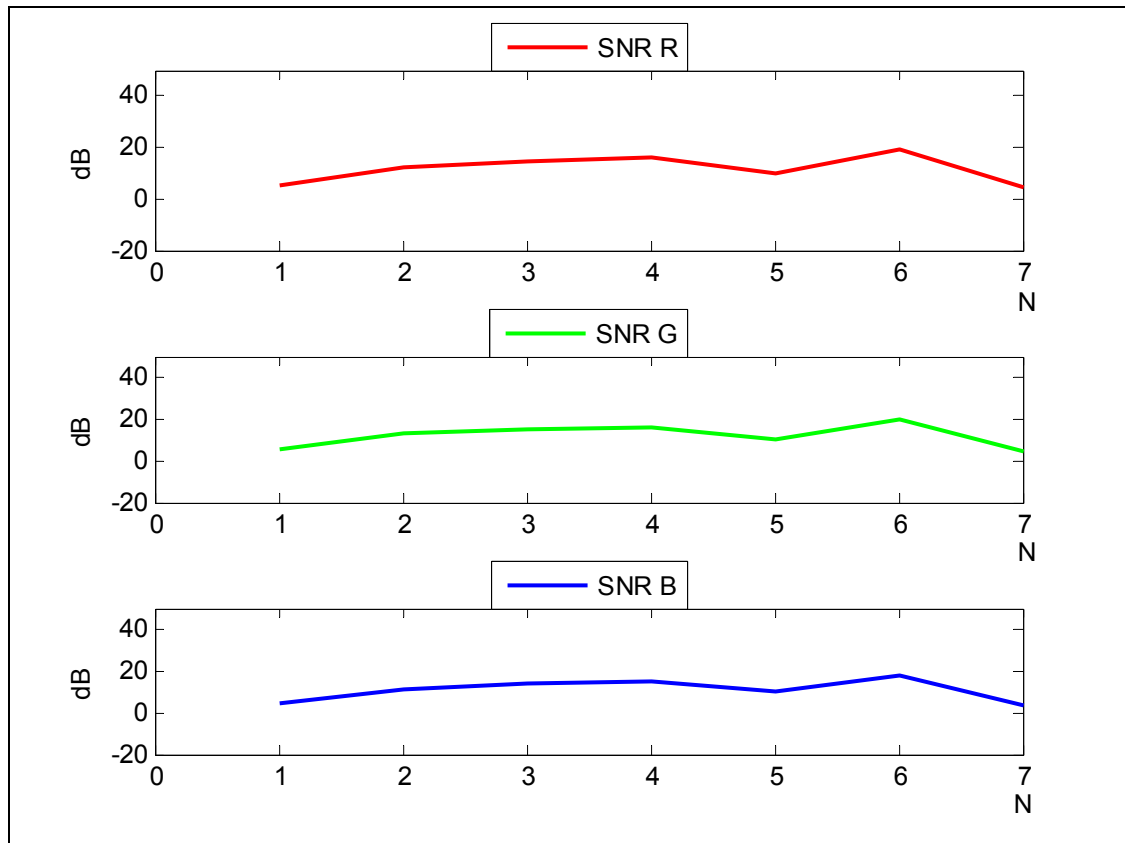


Grafik 60: Lichtfarbe 3693_3695

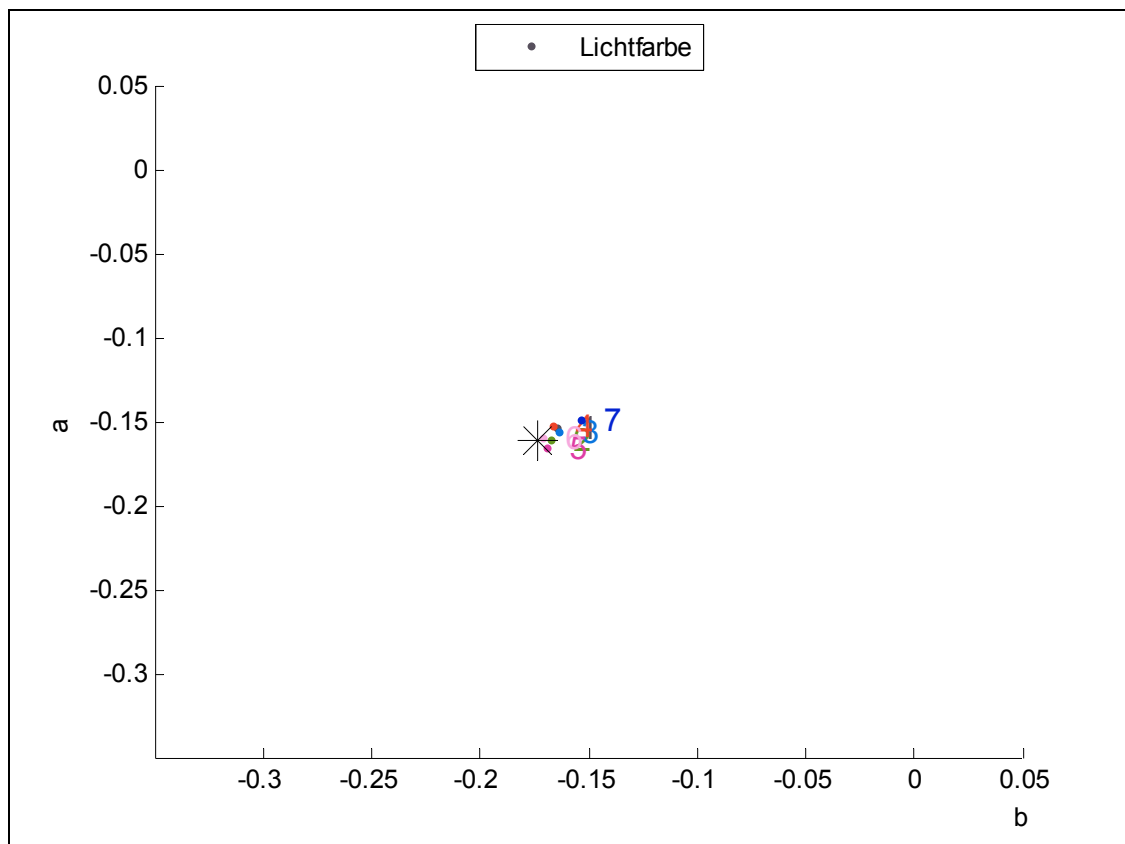
Position 2 Reflex 3721_3723



Grafik 61: 3721_3723

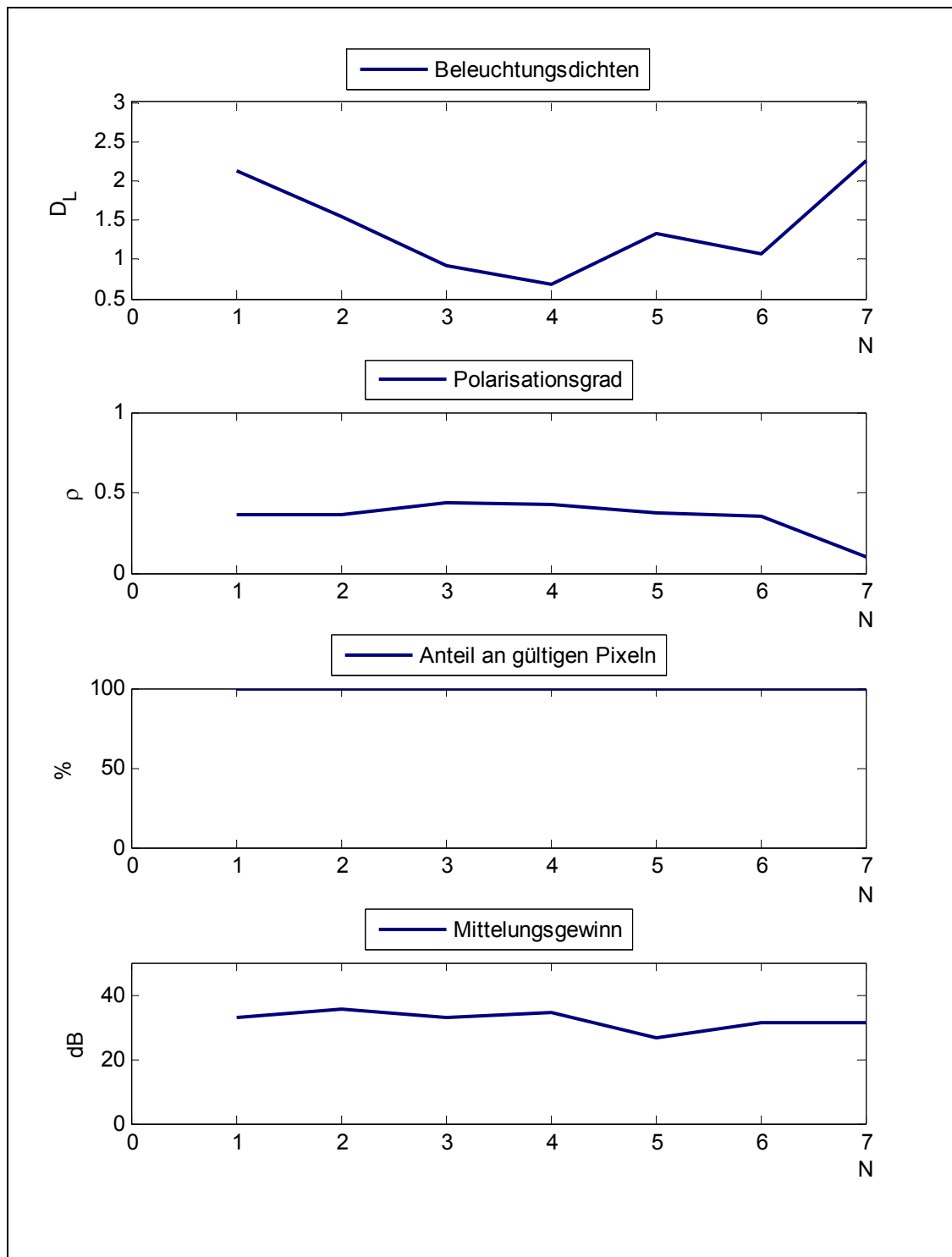


Grafik 62: SNR 3721_3723

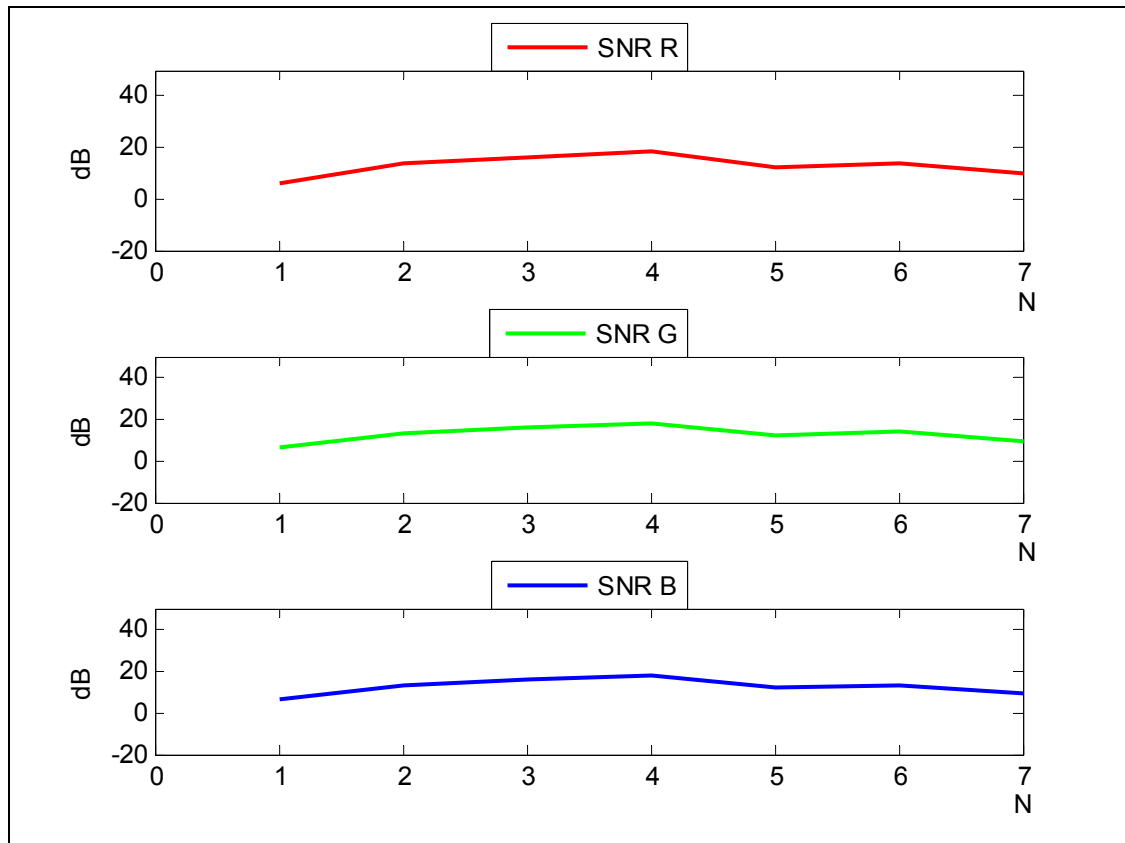


Grafik 63: Lichtfarbe 3721_3723

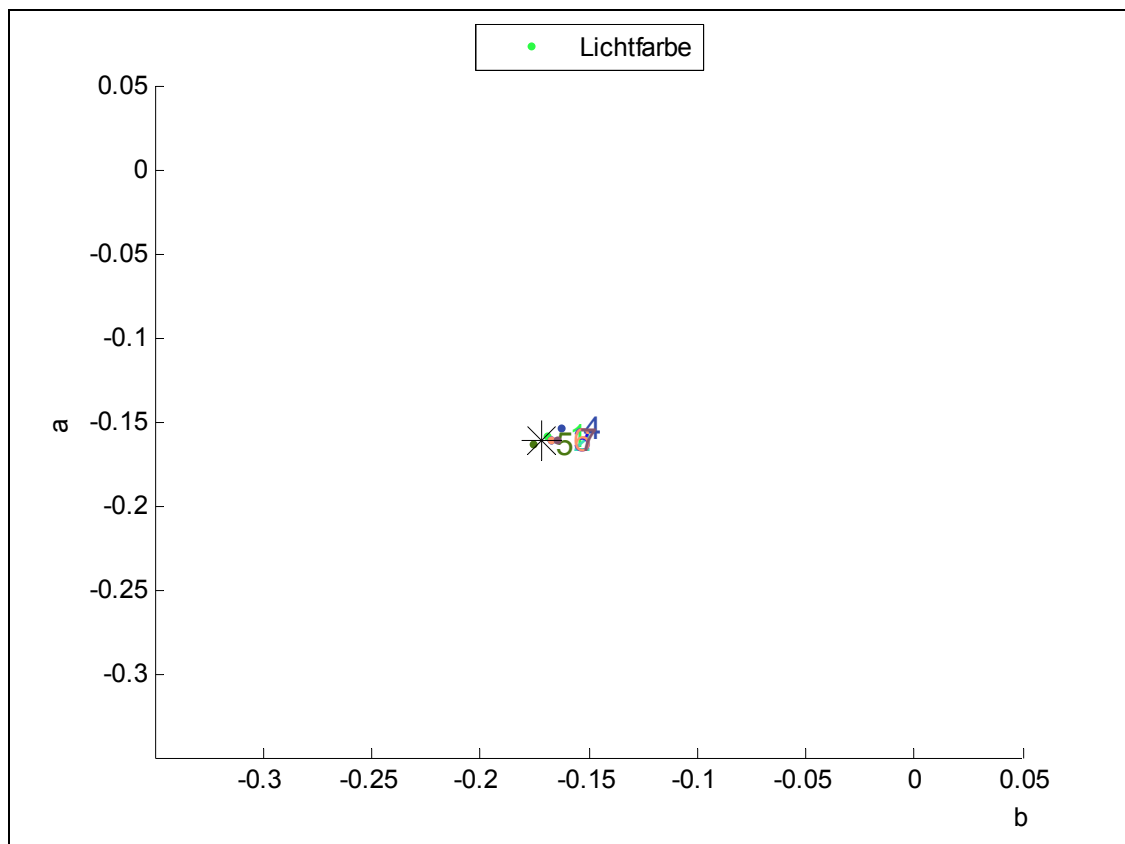
Position 3 Reflex 3248_3750



Grafik 64: 3748_3750

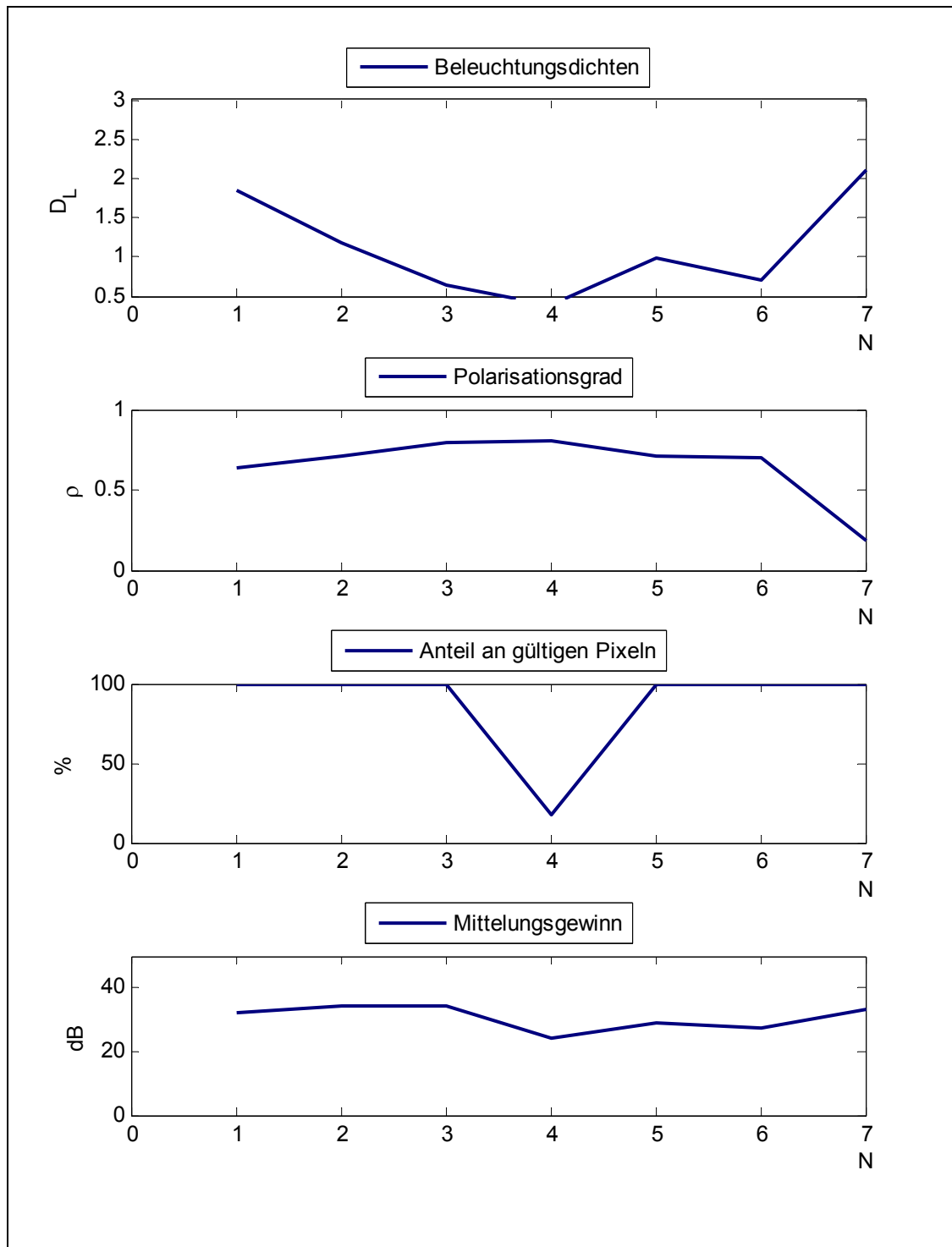


Grafik 65: SNR 3748_3750

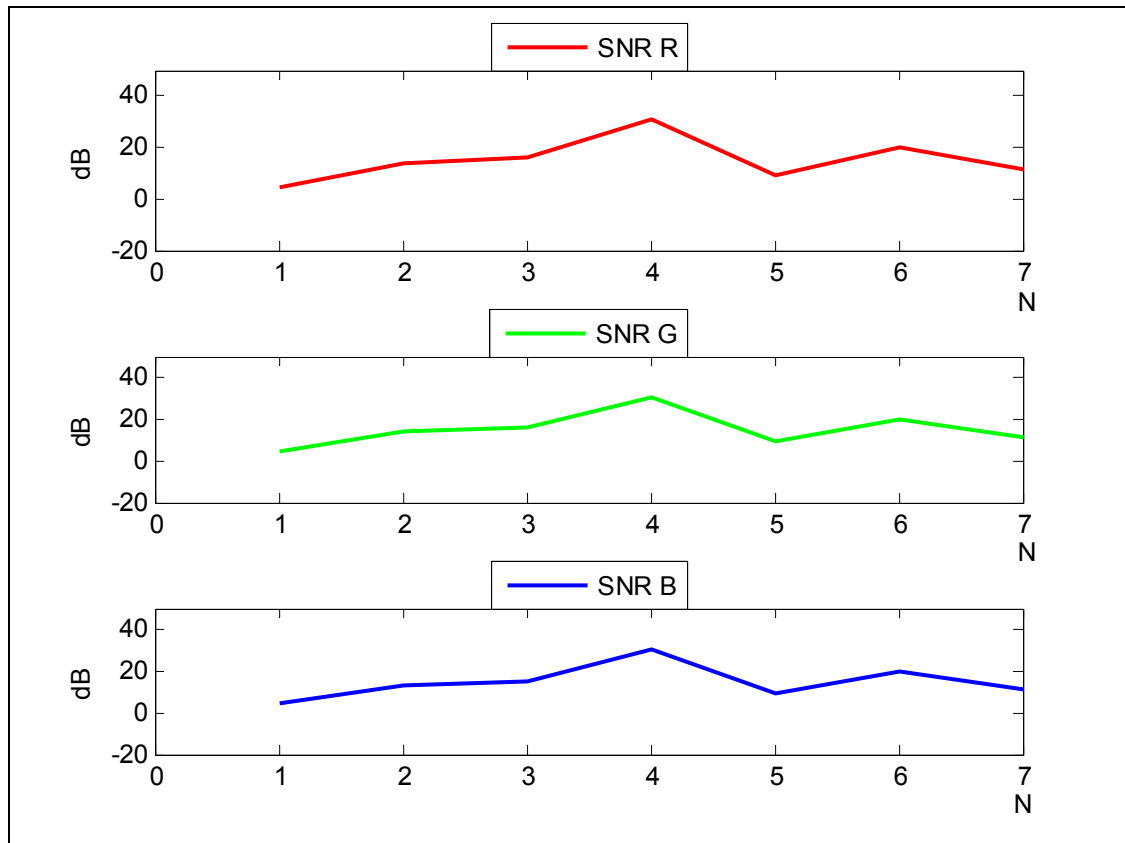


Grafik 66: Lichtfarbe 3748_3750

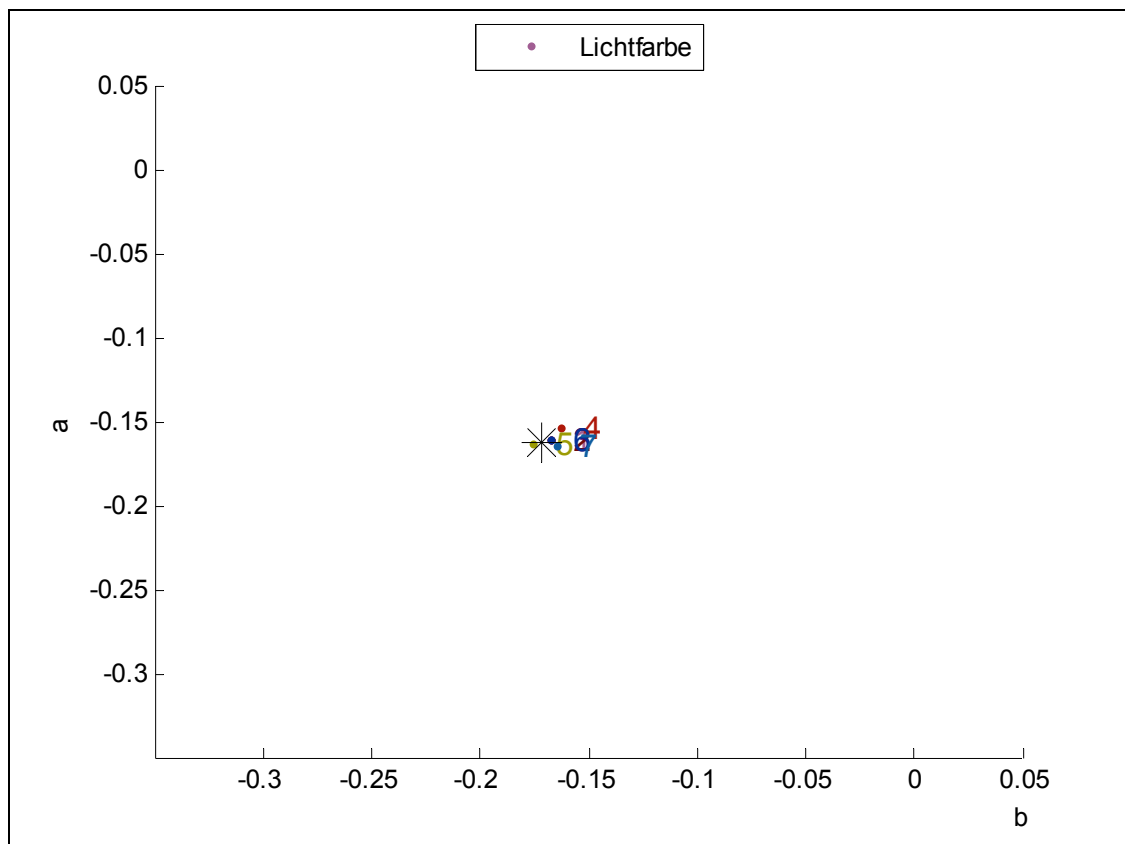
Position 4 Reflex 3770_3772



Grafik 67: 3770_3772

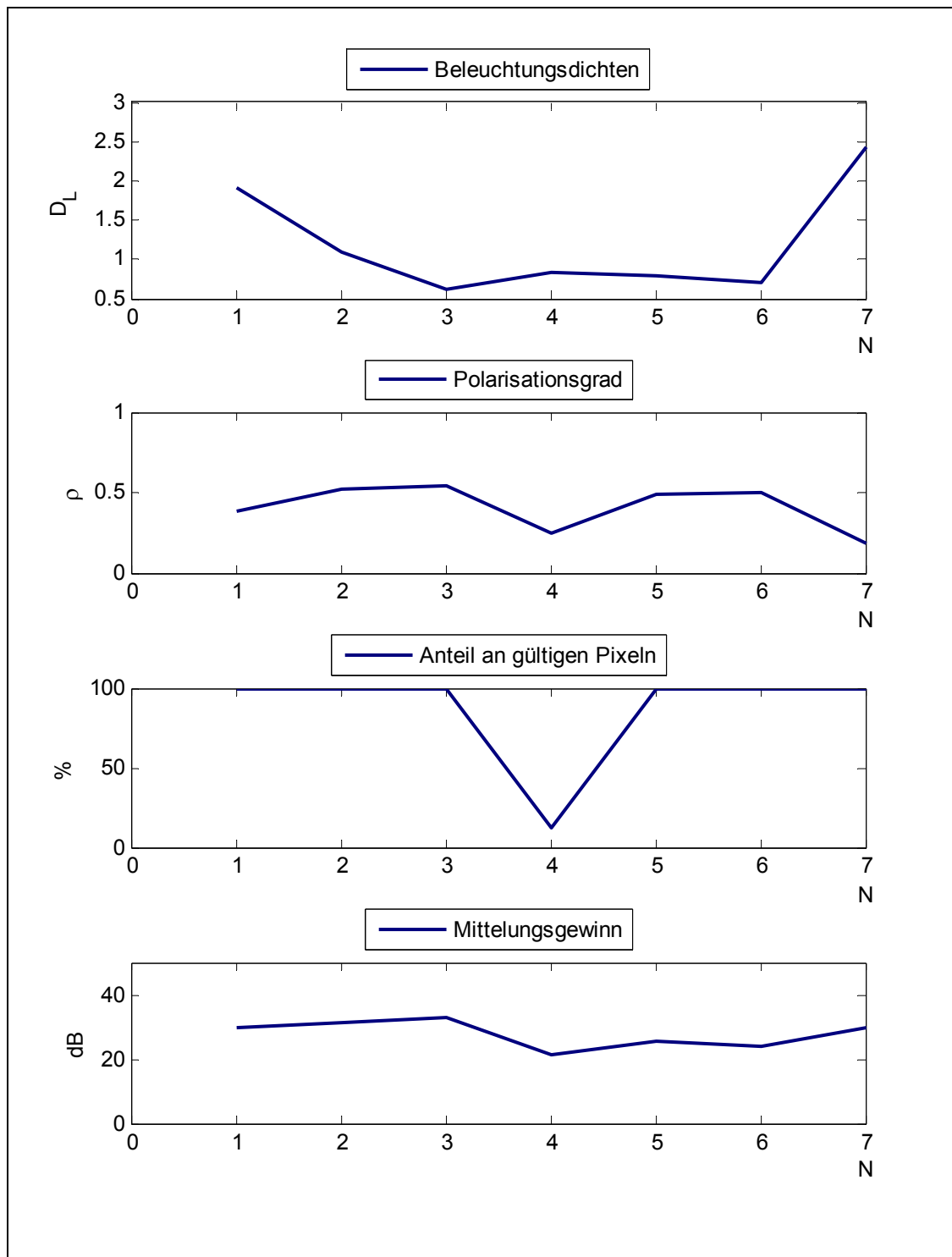


Grafik 68: SNR 3770_3772

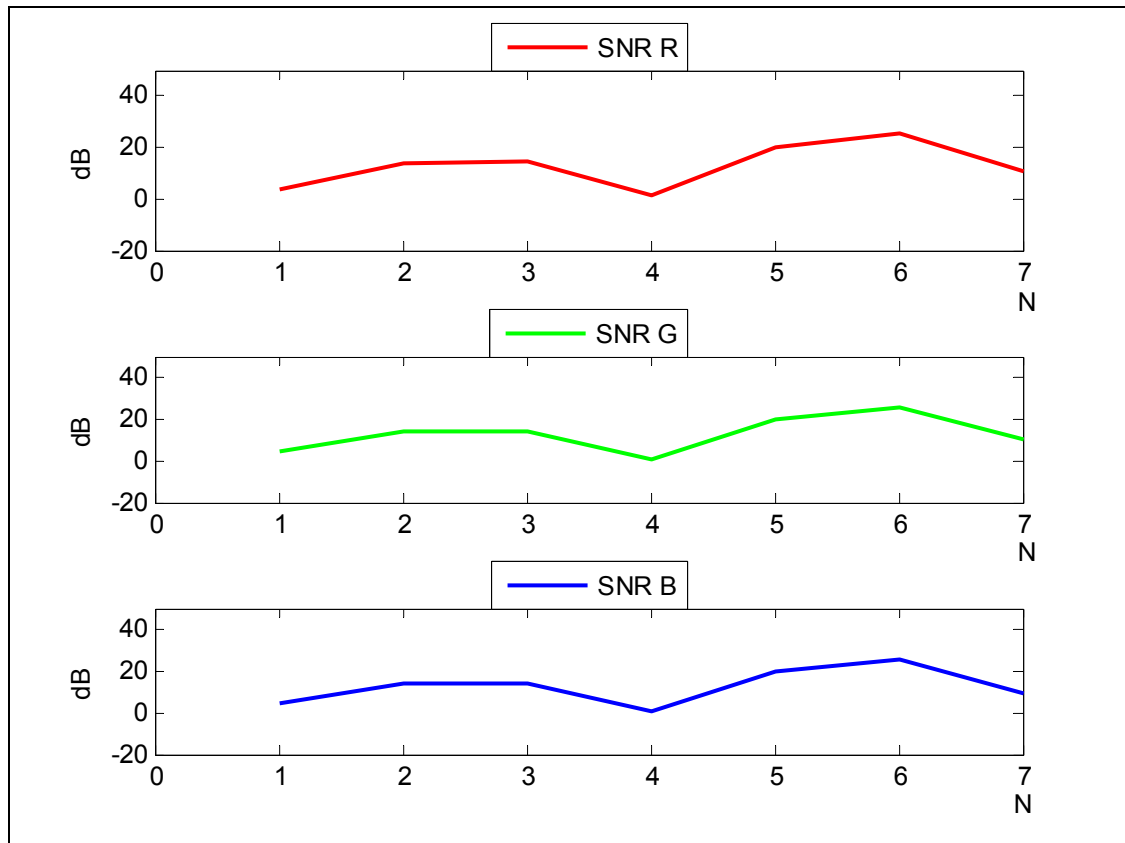


Grafik 69: Lichtfarbe 3770_3772

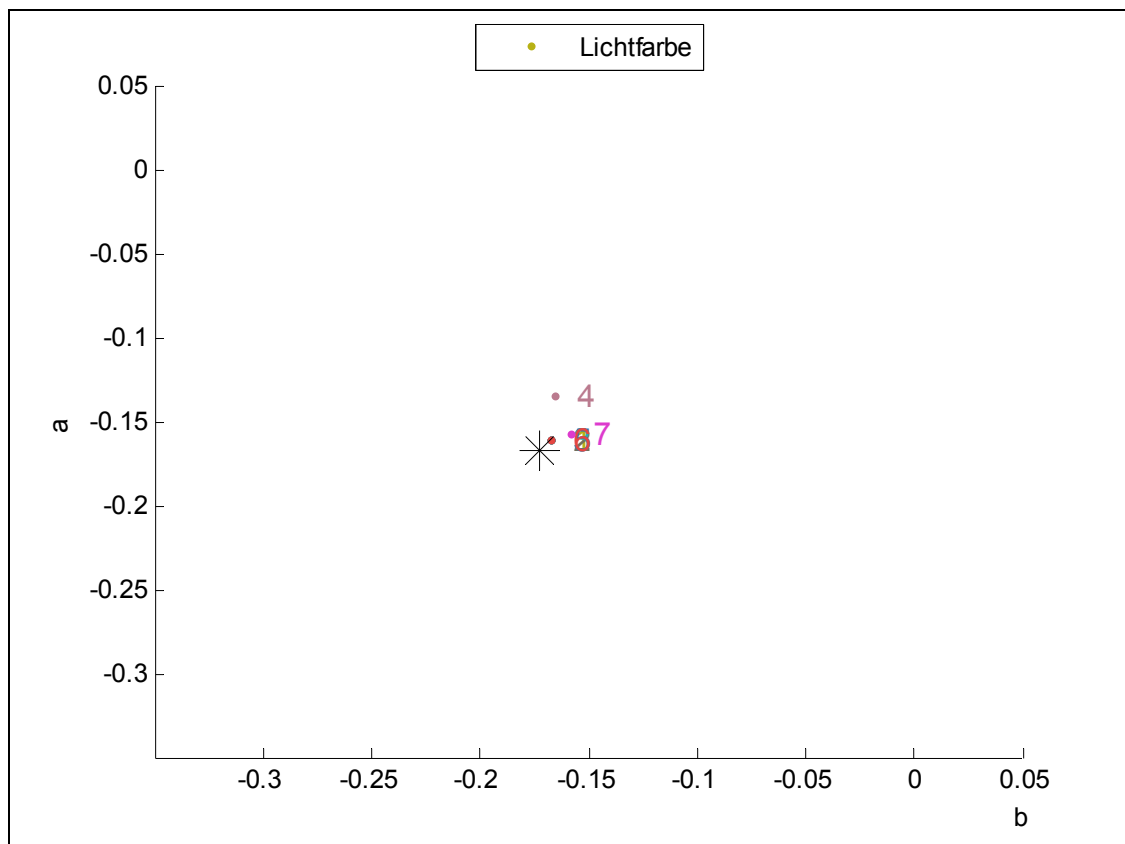
Position 5 Reflex 3789_3791



Grafik 70: 3786_3788



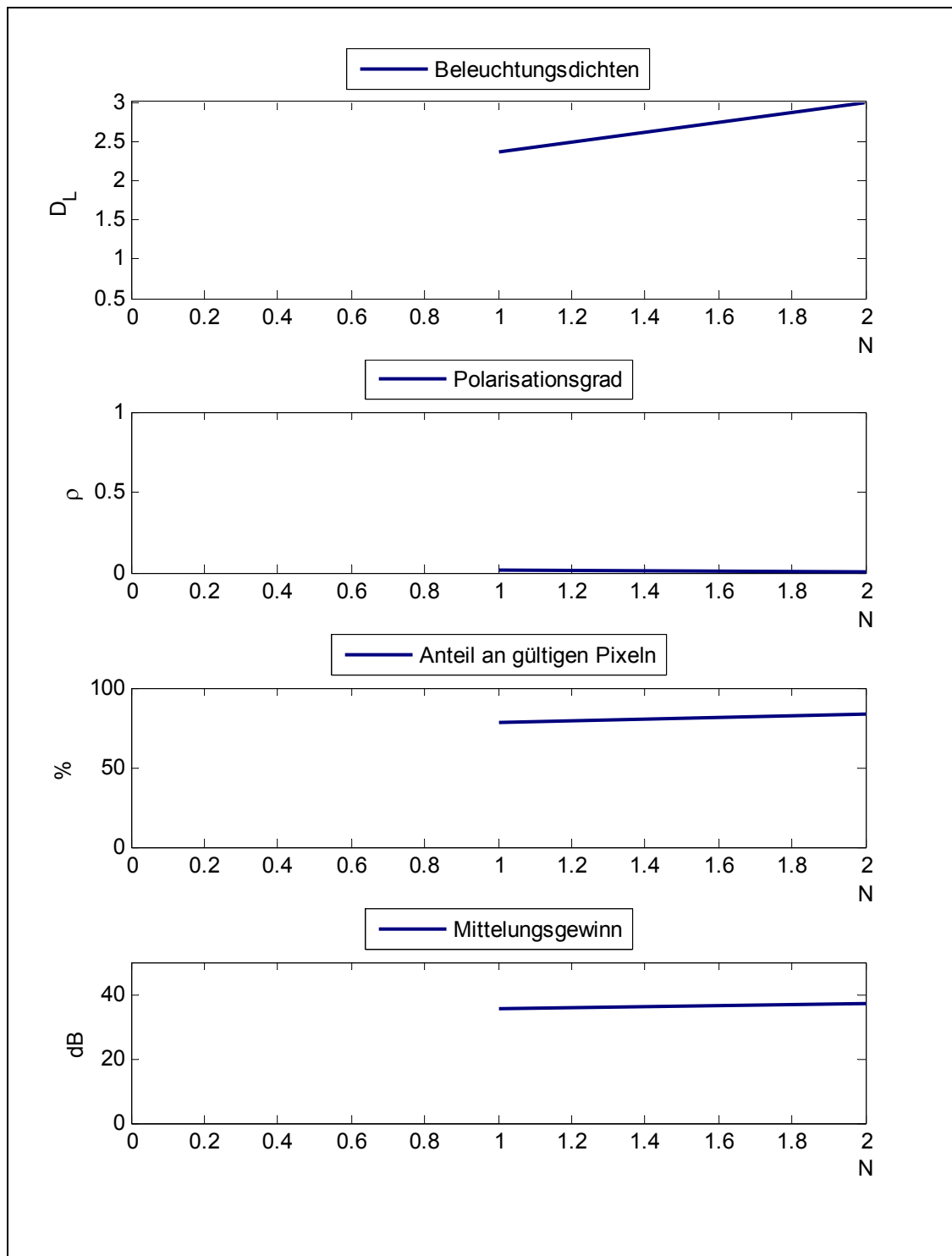
Grafik 71: SNR 3789_3791



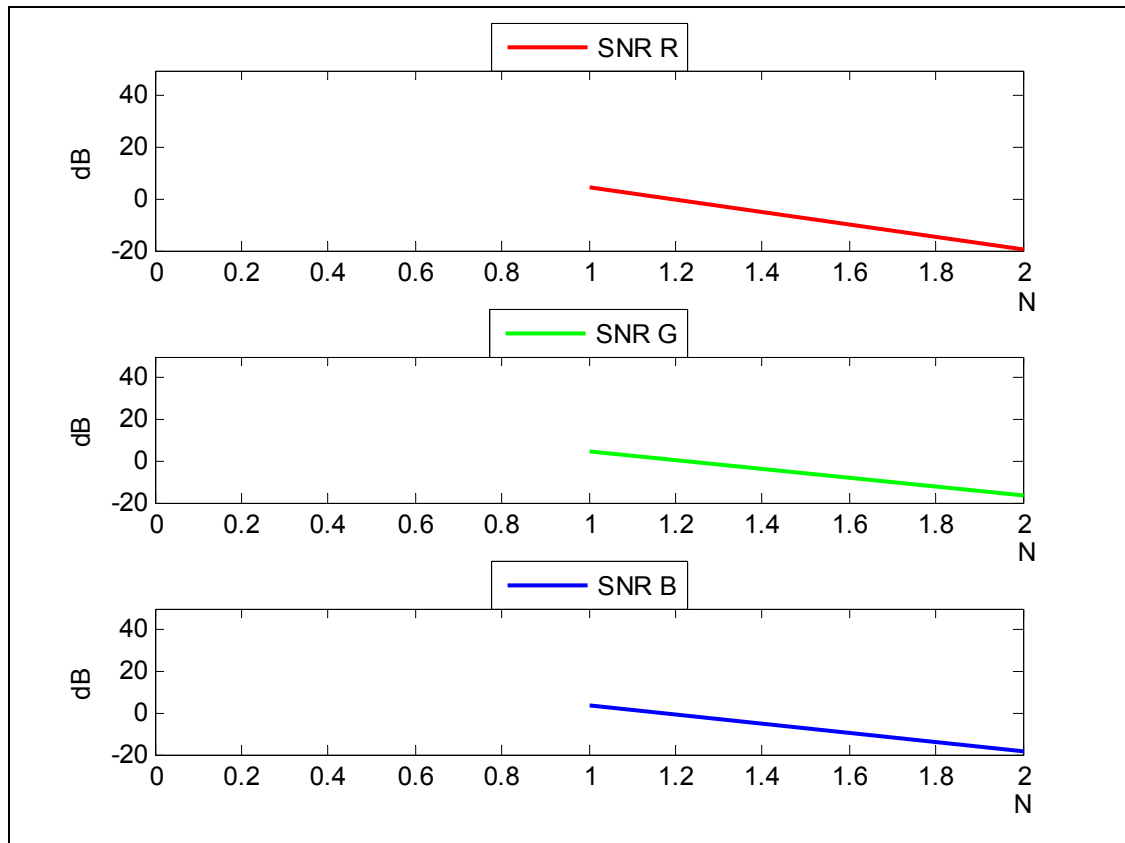
Grafik 72: Lichtfarbe 3789_3791

Position 1 N+1,5 3700_3702

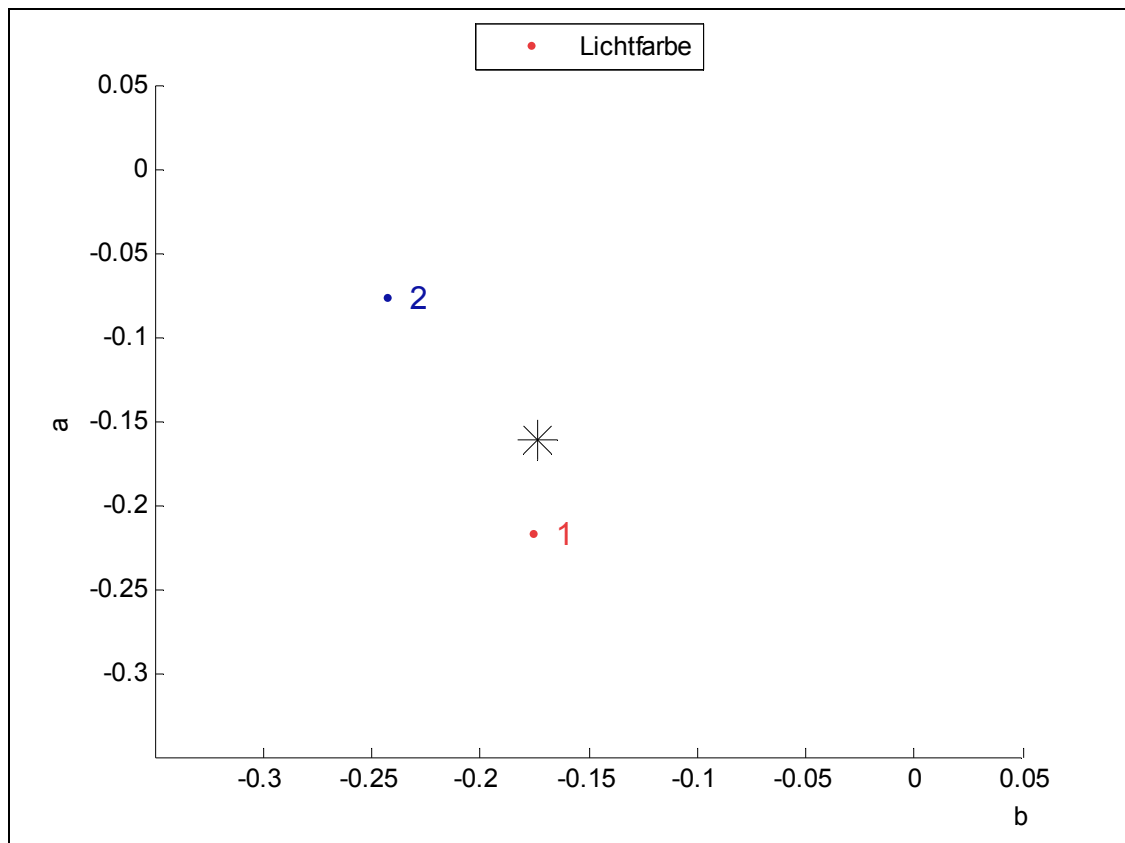
Es wurden 2 Messfelder für die Untersuchung der Reflexion an dunklen Oberflächen ausgewählt: Pappe, schwarz (1), Gras (2). Der Referenzort entspricht der Lichtfarbe auf der Graukarte Belichtung mit N-1.



Grafik 73: 3700_3702

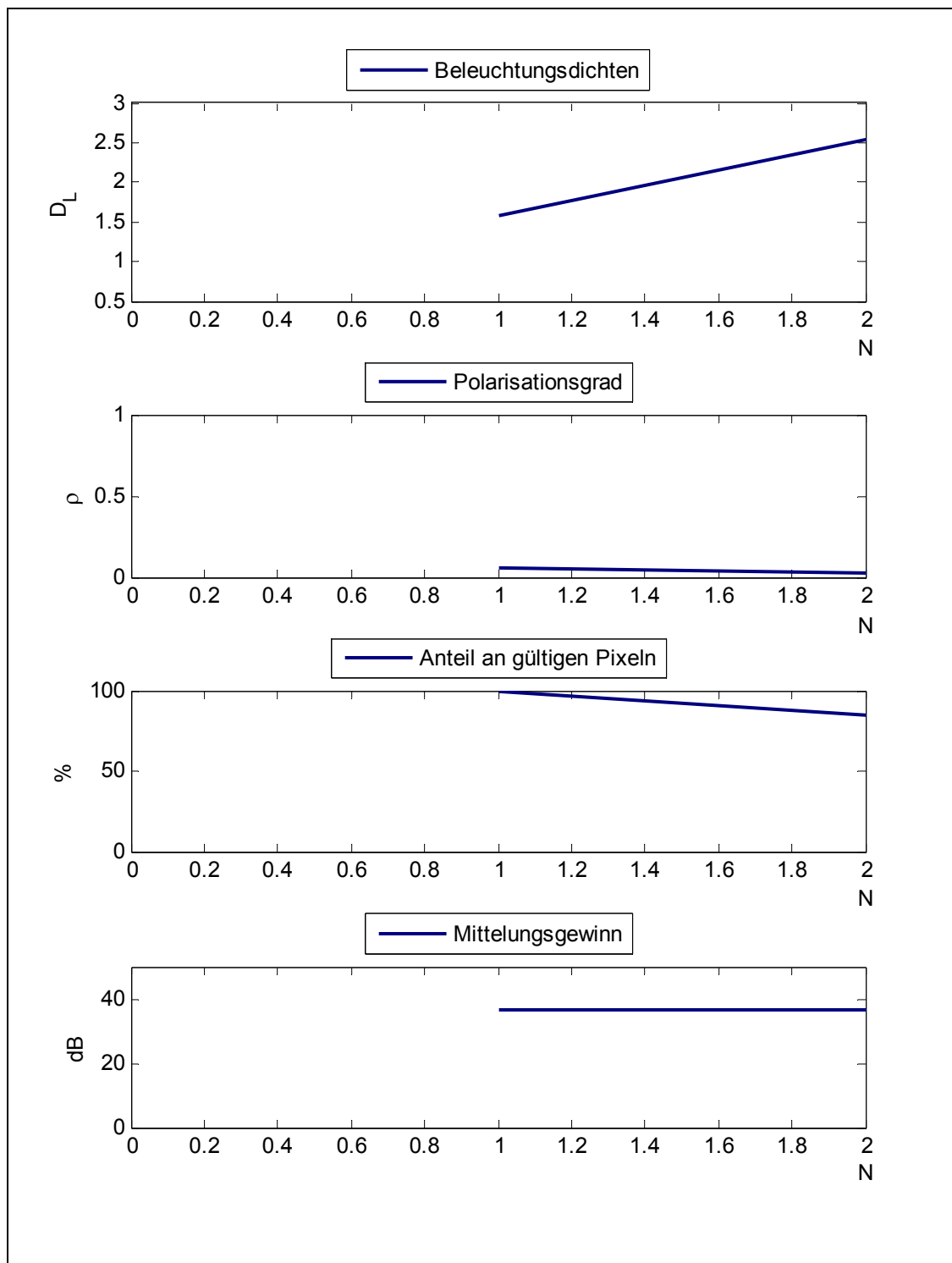


Grafik 74: SNR 3700_3702

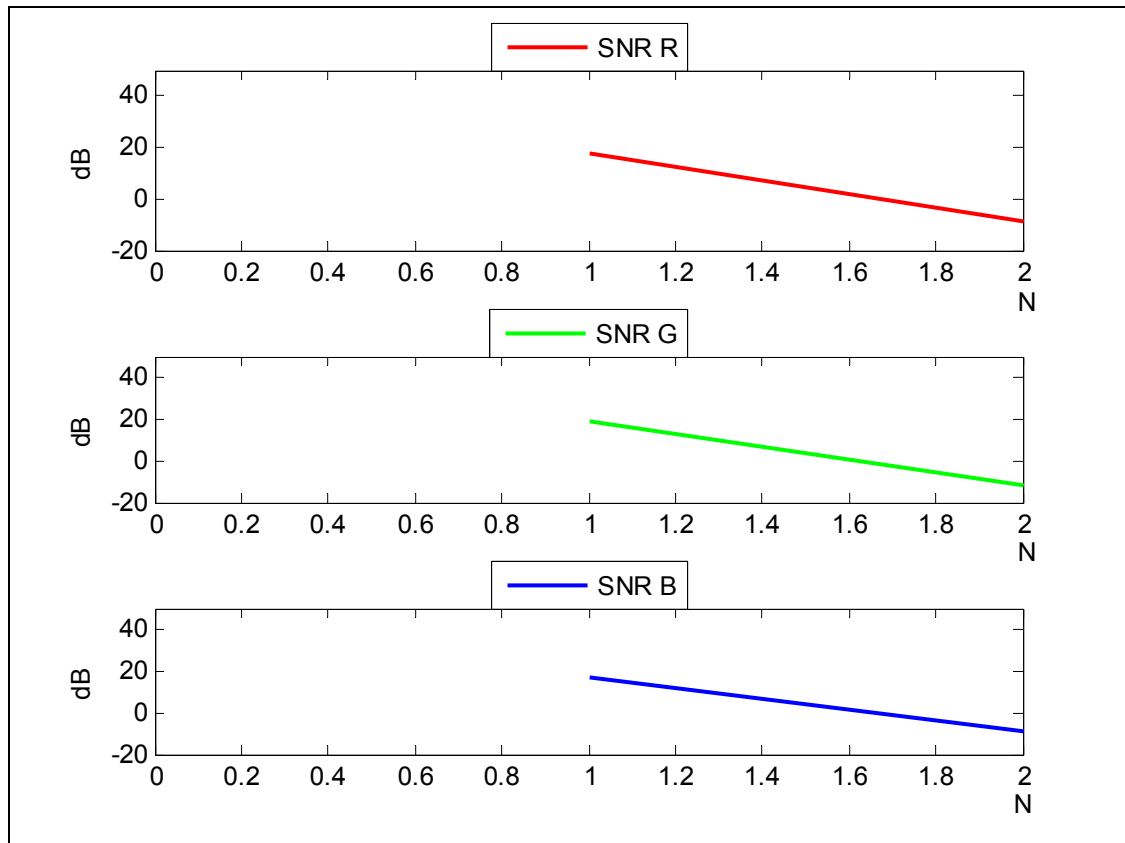


Grafik 75: Lichtfarbe 3700_3702

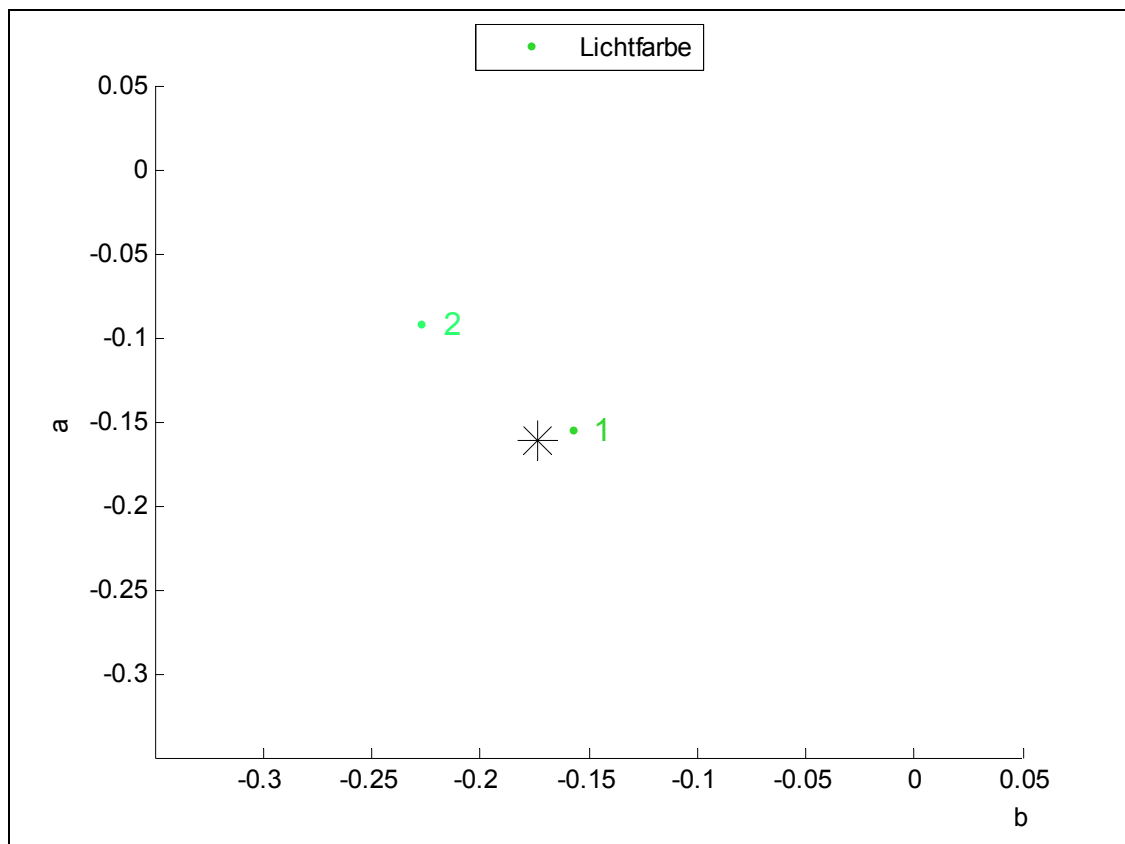
Position 2 N+1,5 3727_3729



Grafik 76: 3727_3729

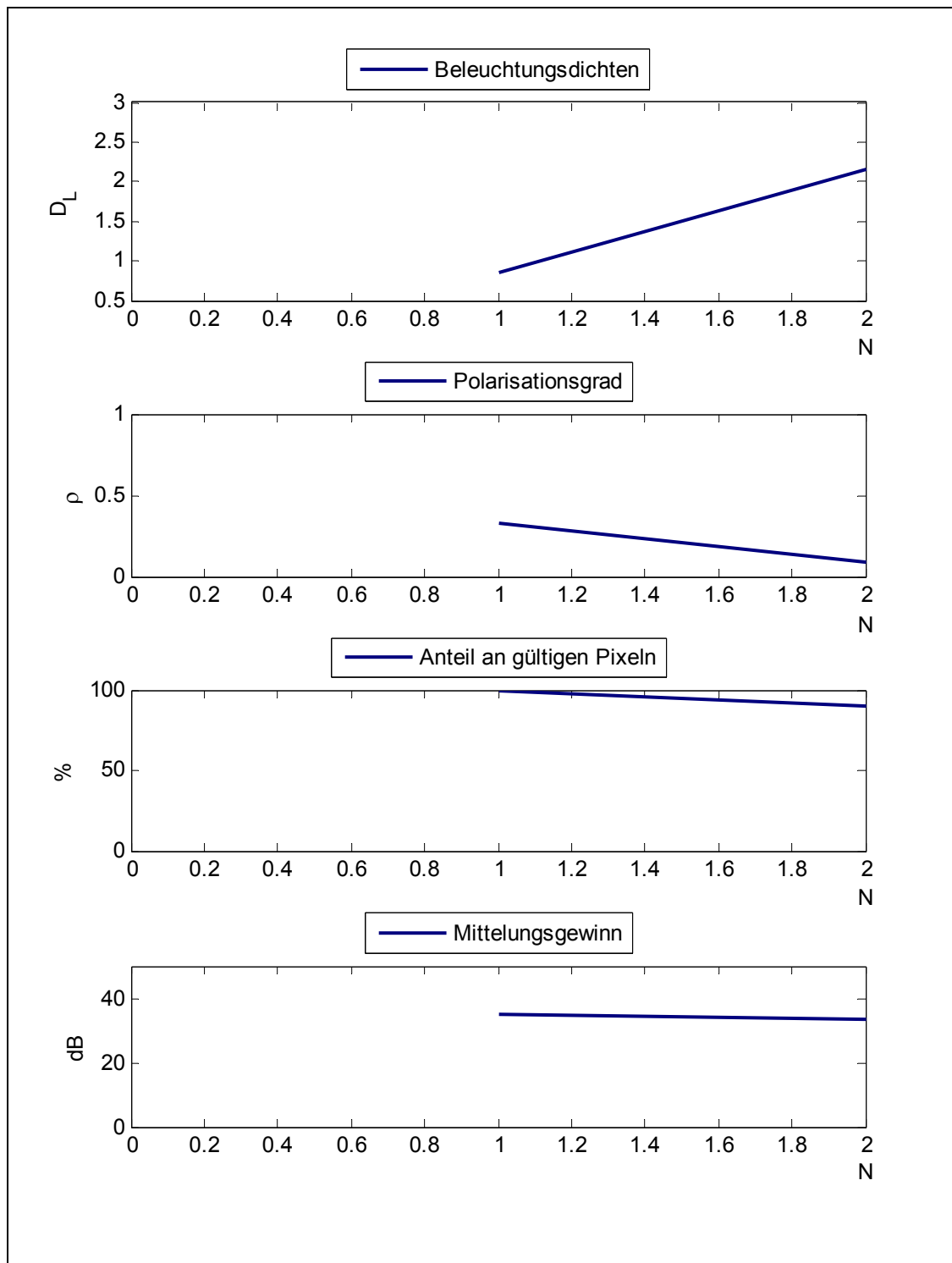


Grafik 77: SNR 3727_3729

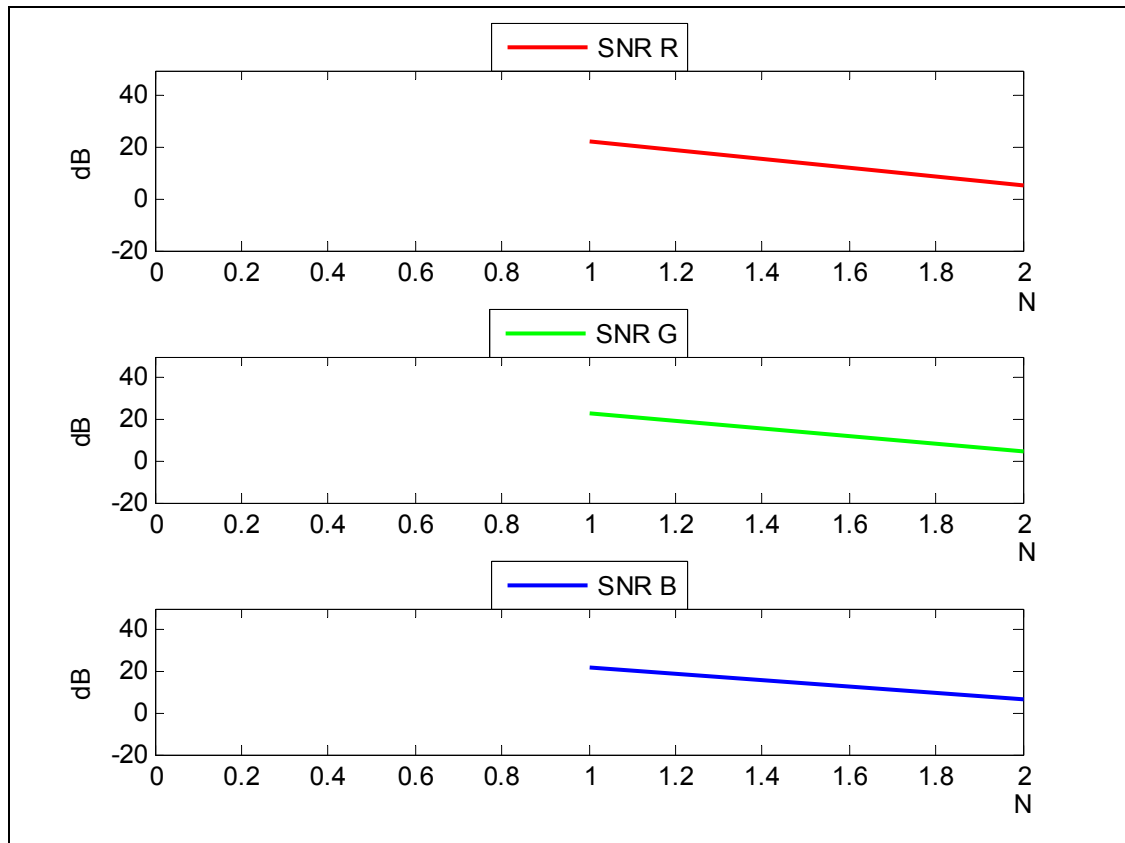


Grafik 78: Lichtfarbe 3727_3729

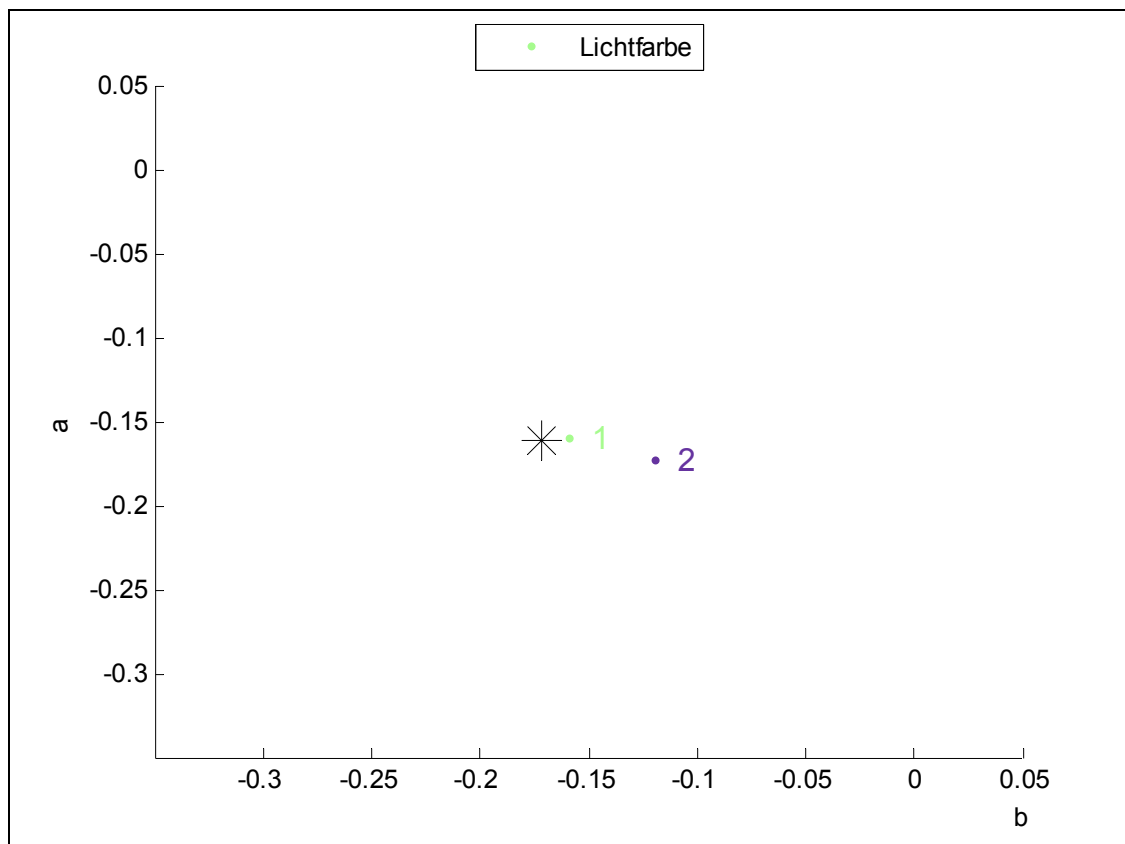
Position 3 N+1,5 3754_3756



Grafik 79: 3754_3756

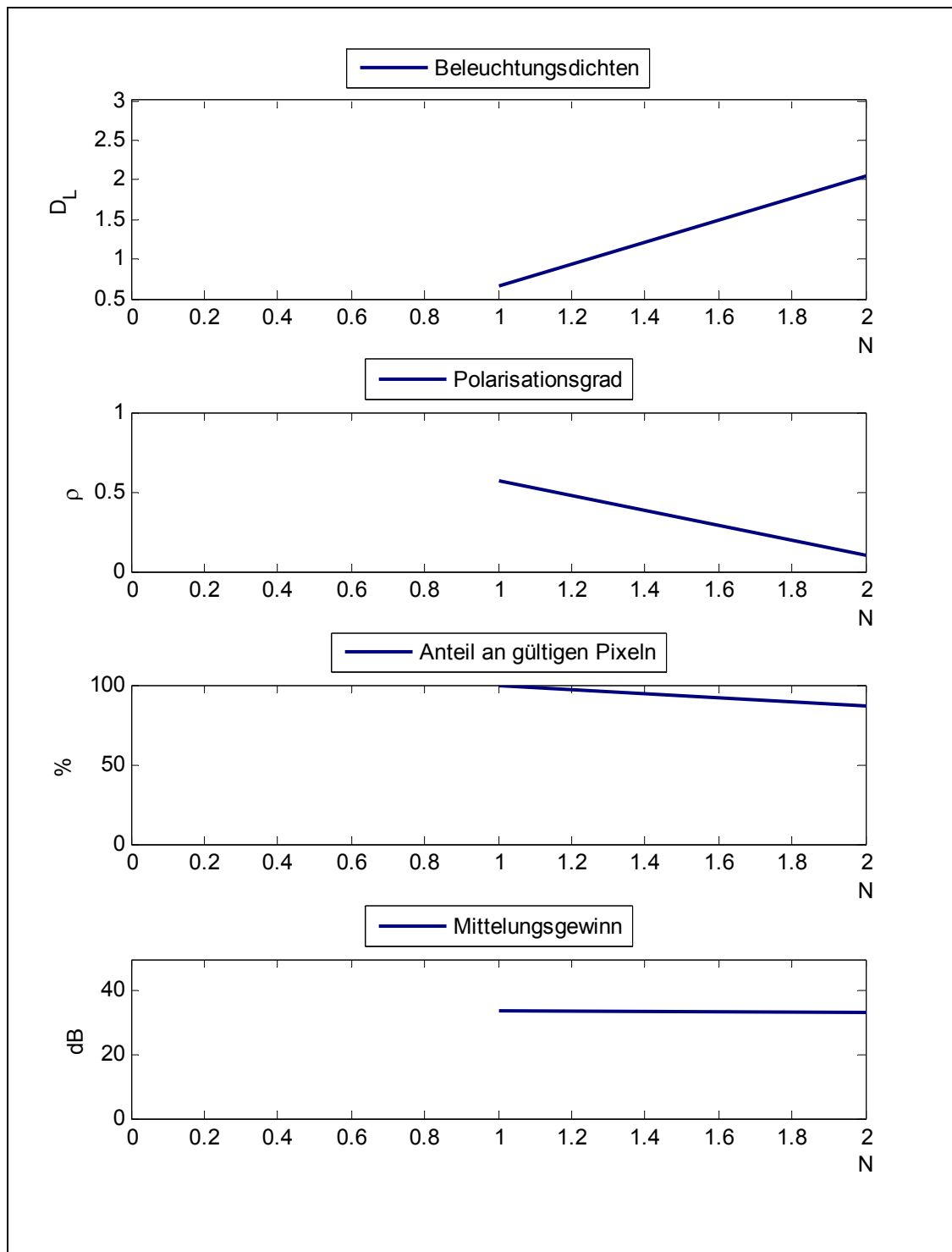


Grafik 80: SNR 3754_3756

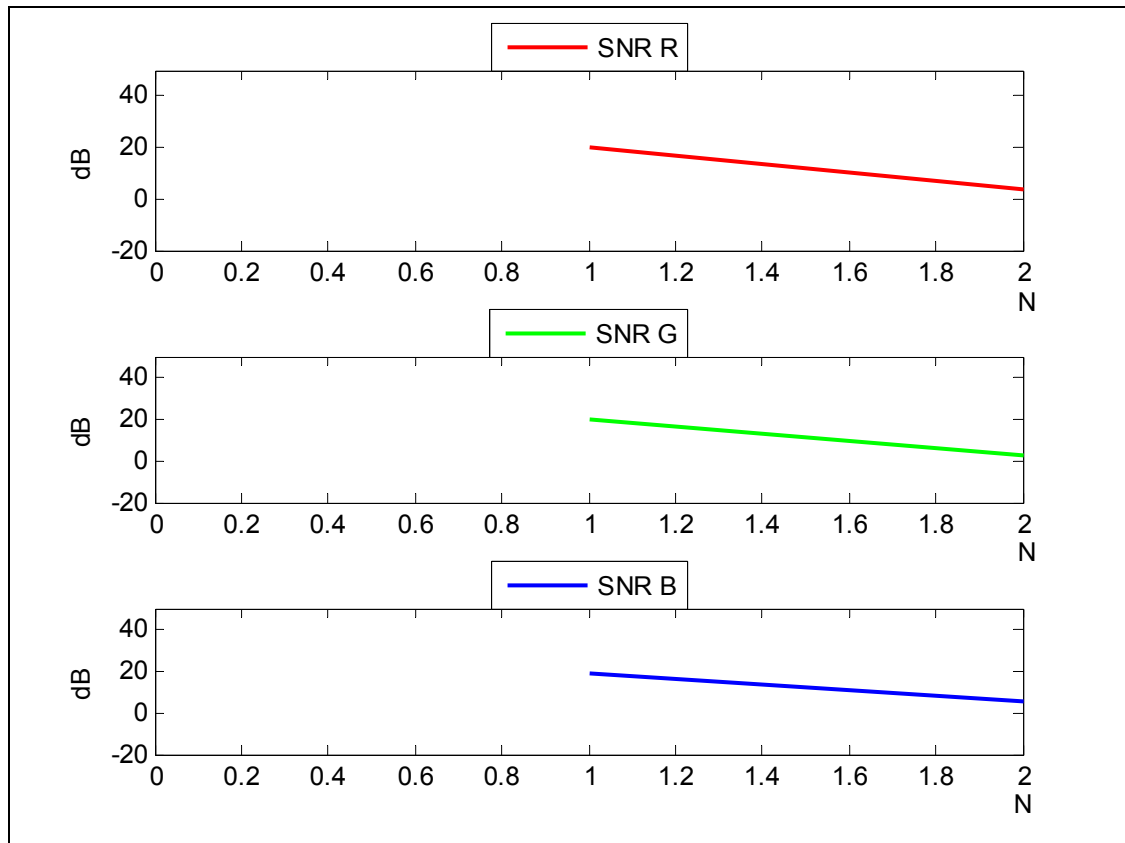


Grafik 81: Lichtfarbe 3754_3756

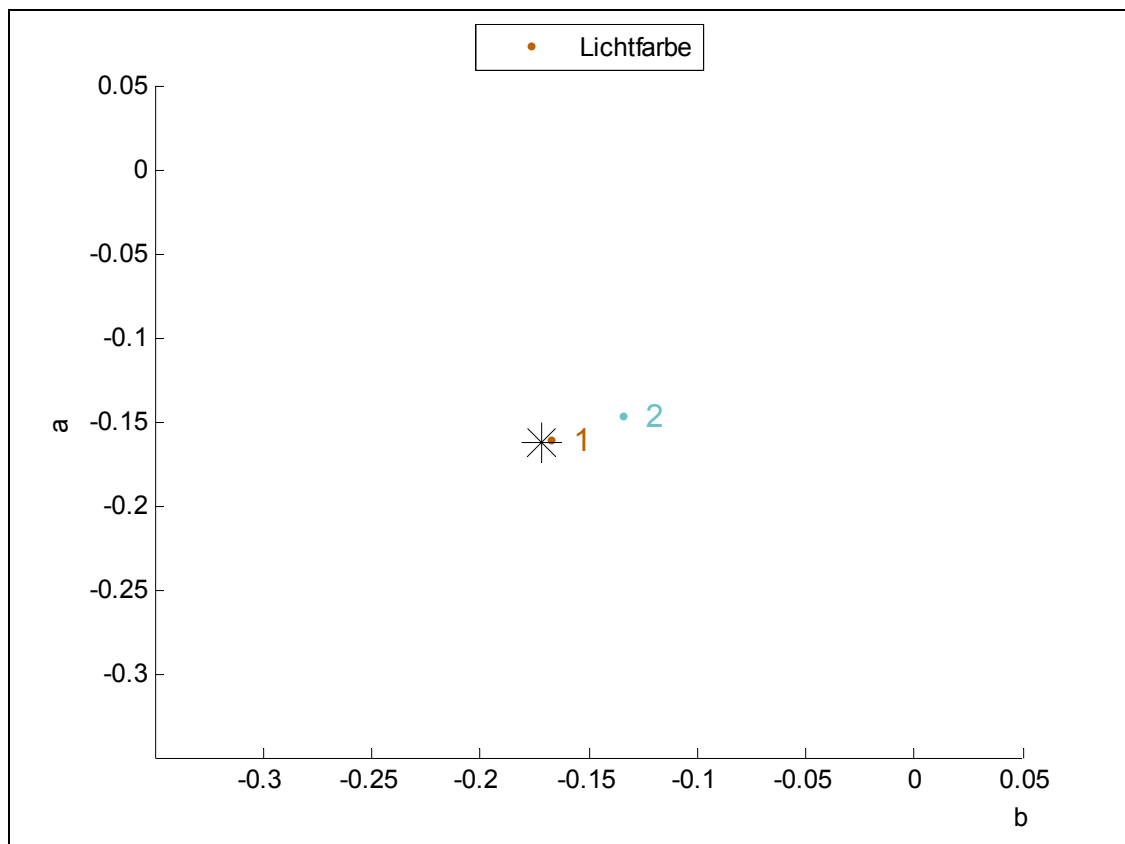
Position 4 N+1,5 3777_3779



Grafik 82: 3777_3779

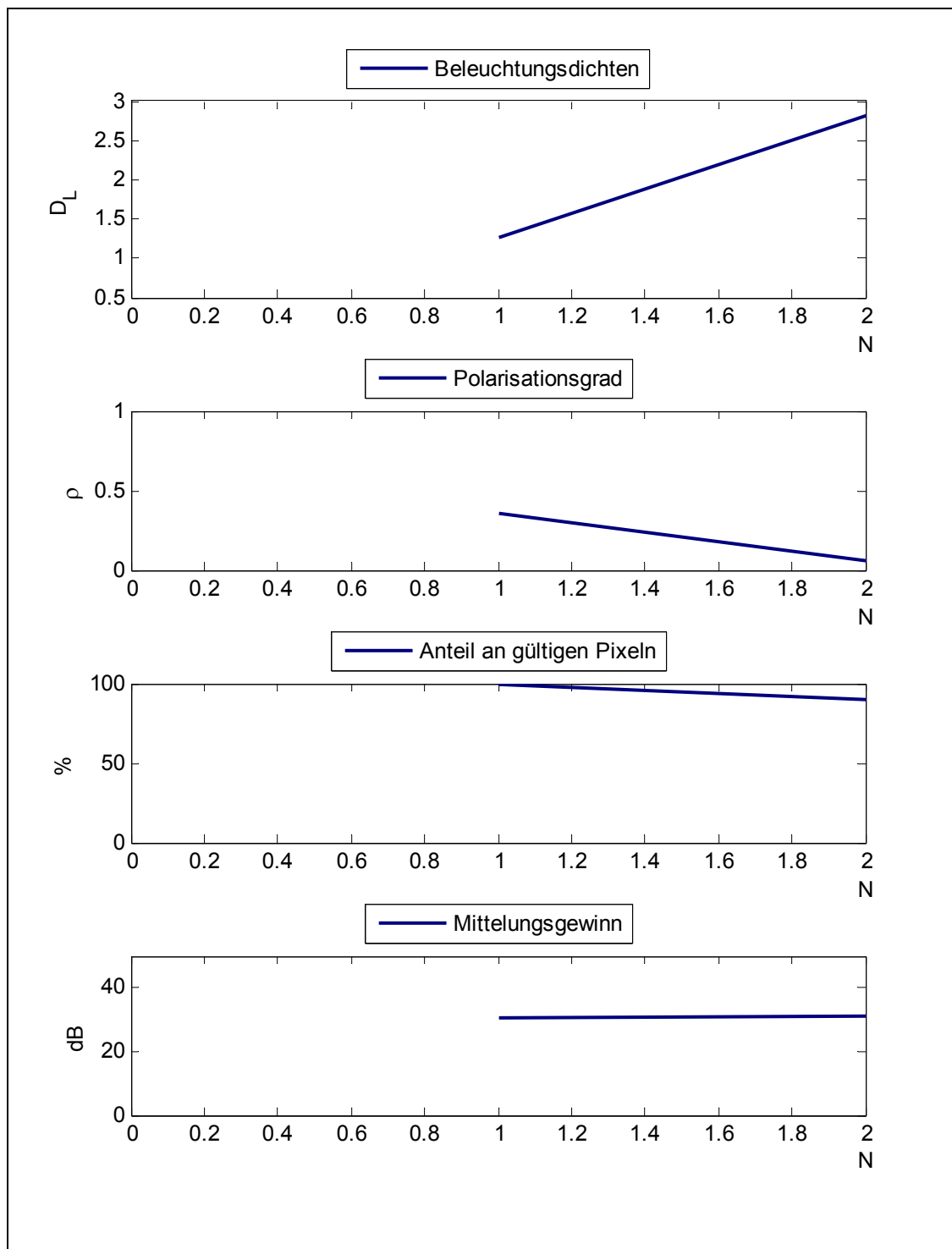


Grafik 83: SNR 3777_3779

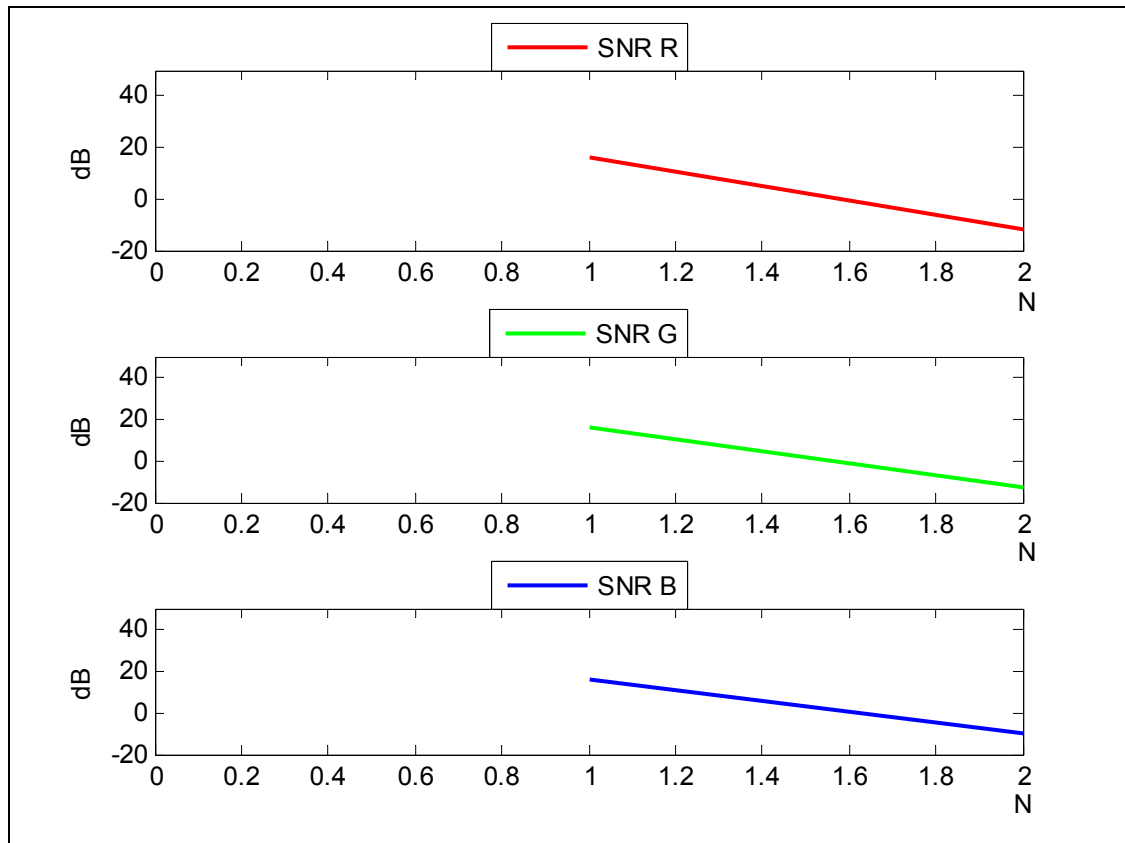


Grafik 84: Lichtfarbe 3777_3779

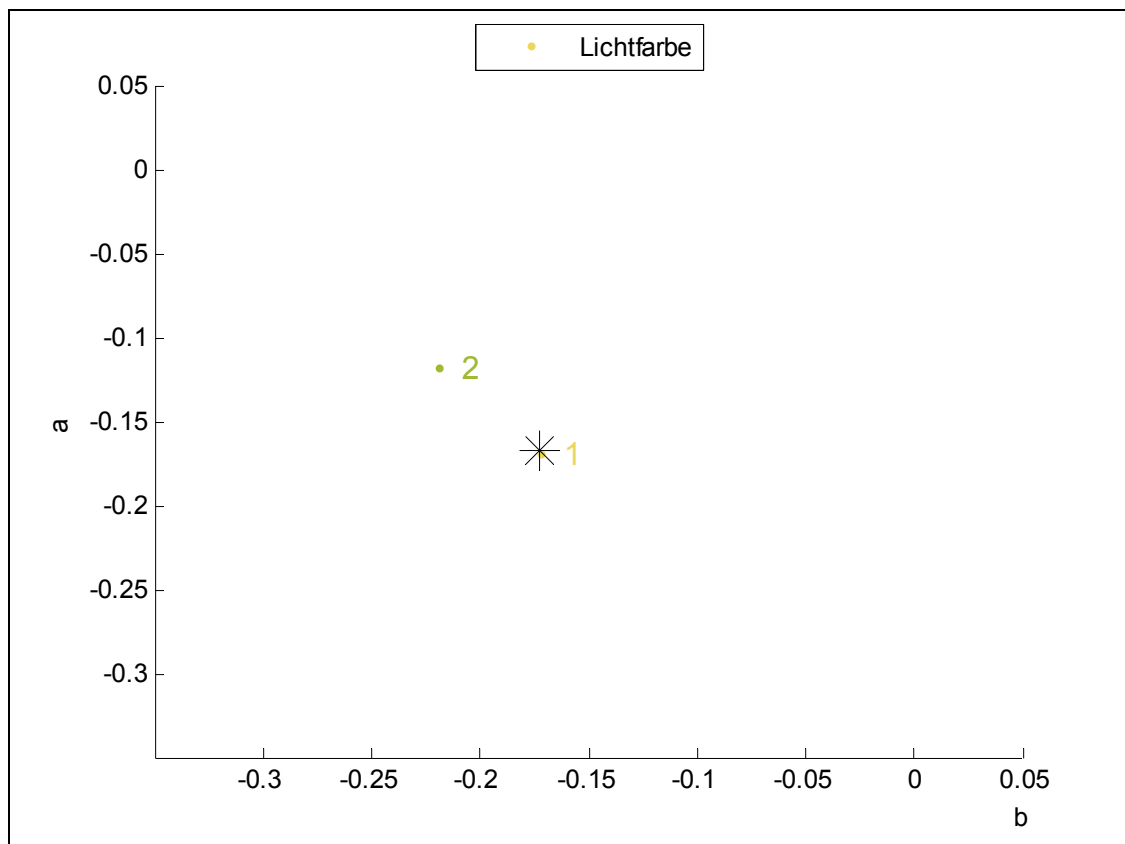
Position 5 N+1,5 3792_3794



Grafik 85: 3792_3794



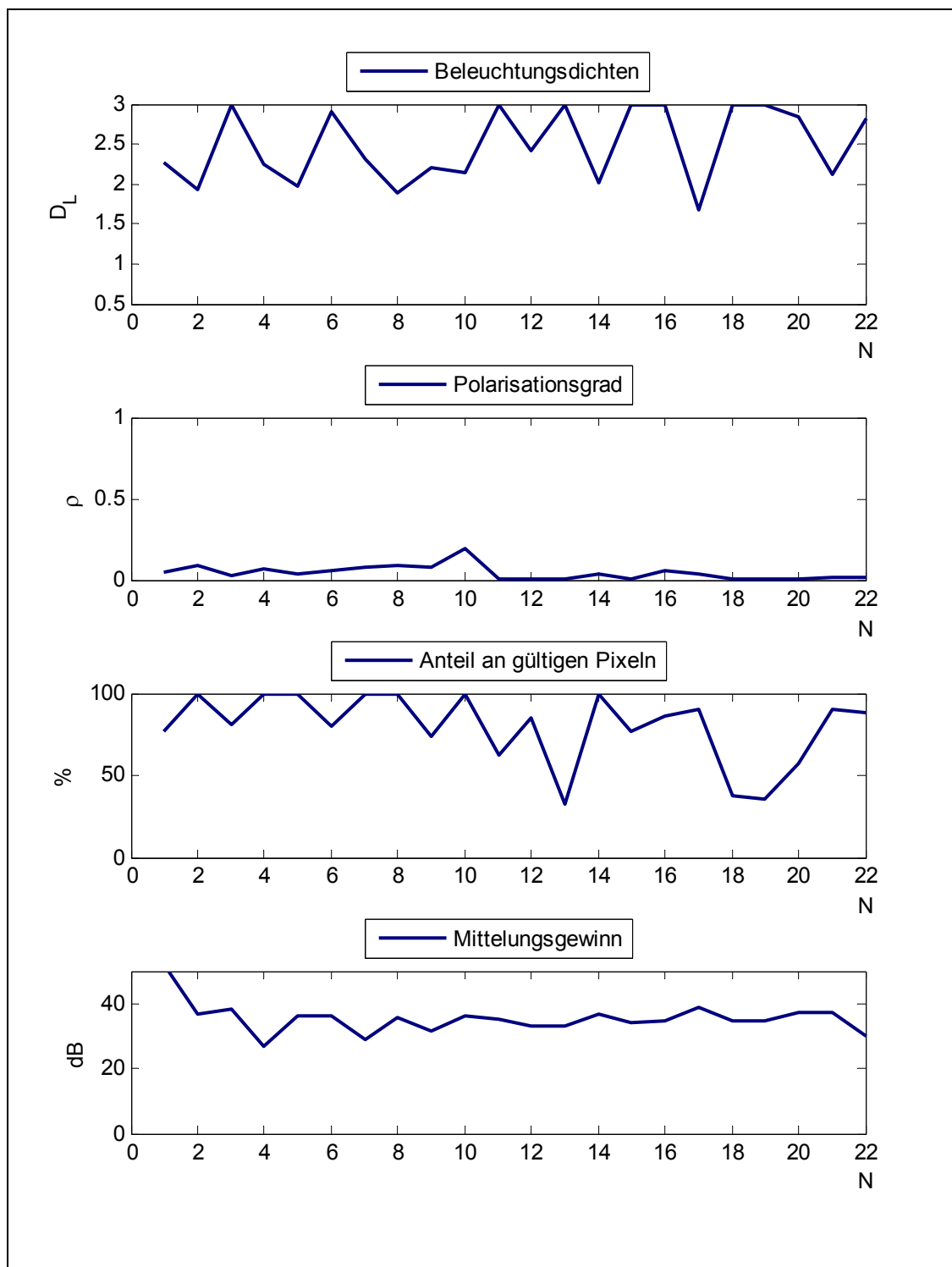
Grafik 86: SNR 3792_3794



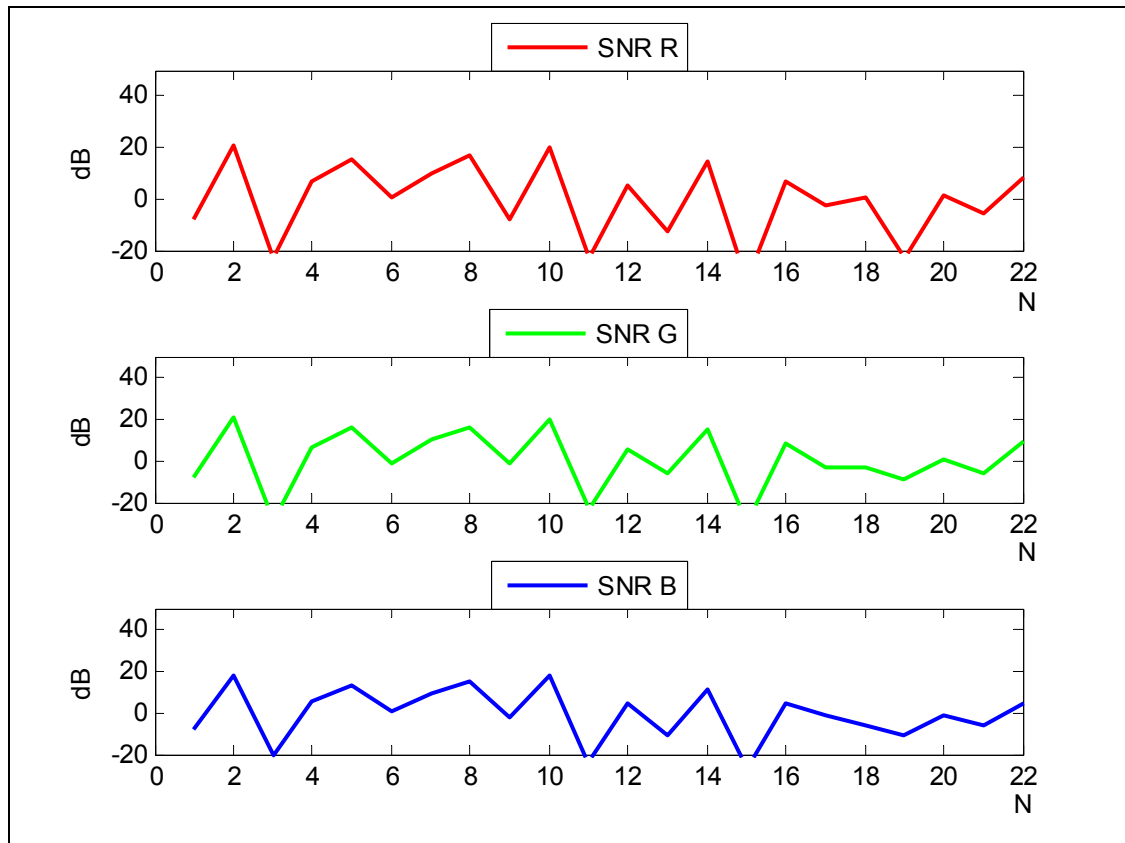
Grafik 87: Lichtfarbe 3792_3794

Licht: Standort 1 / Kamera: Standort 5

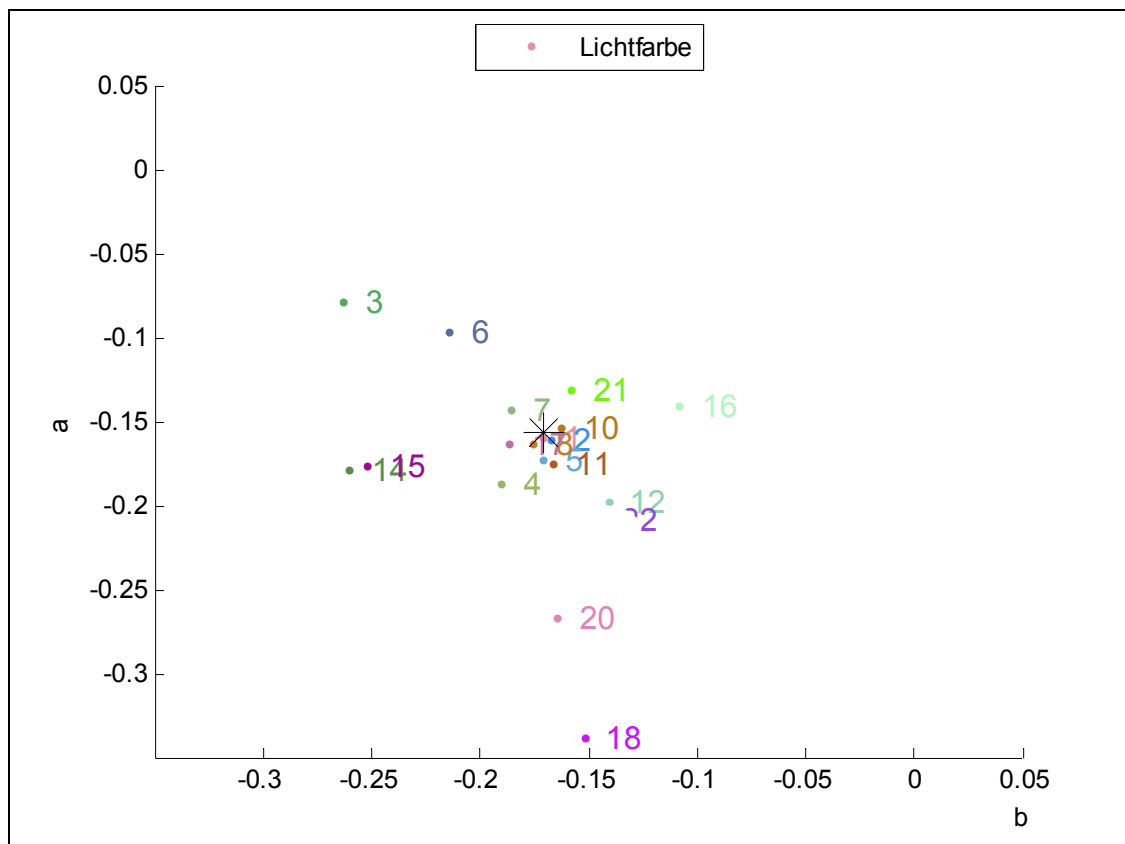
N-1 3795_3797 Szenenbeleuchtung



Grafik 88: 3795_3797



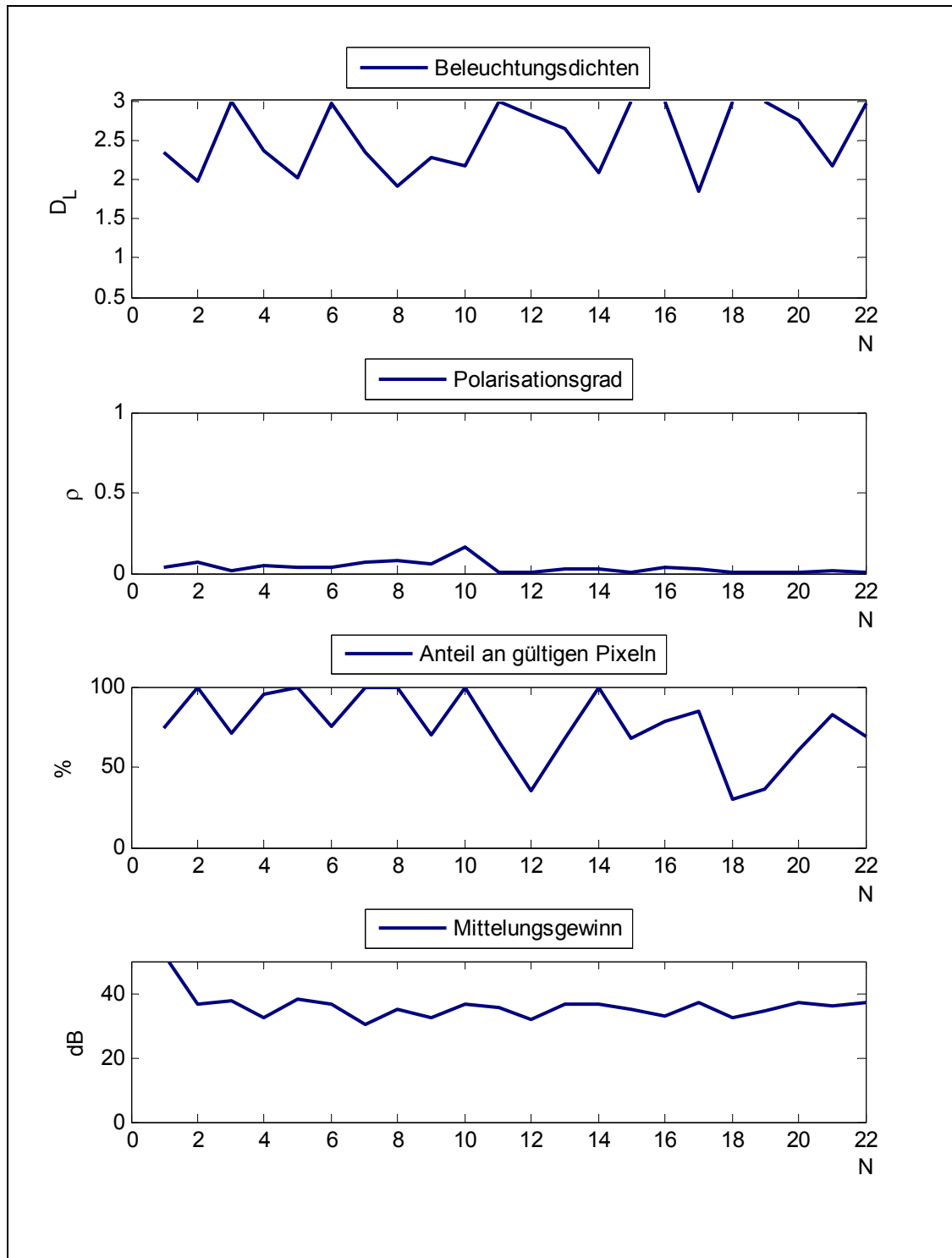
Grafik 89: SNR 3795_3797



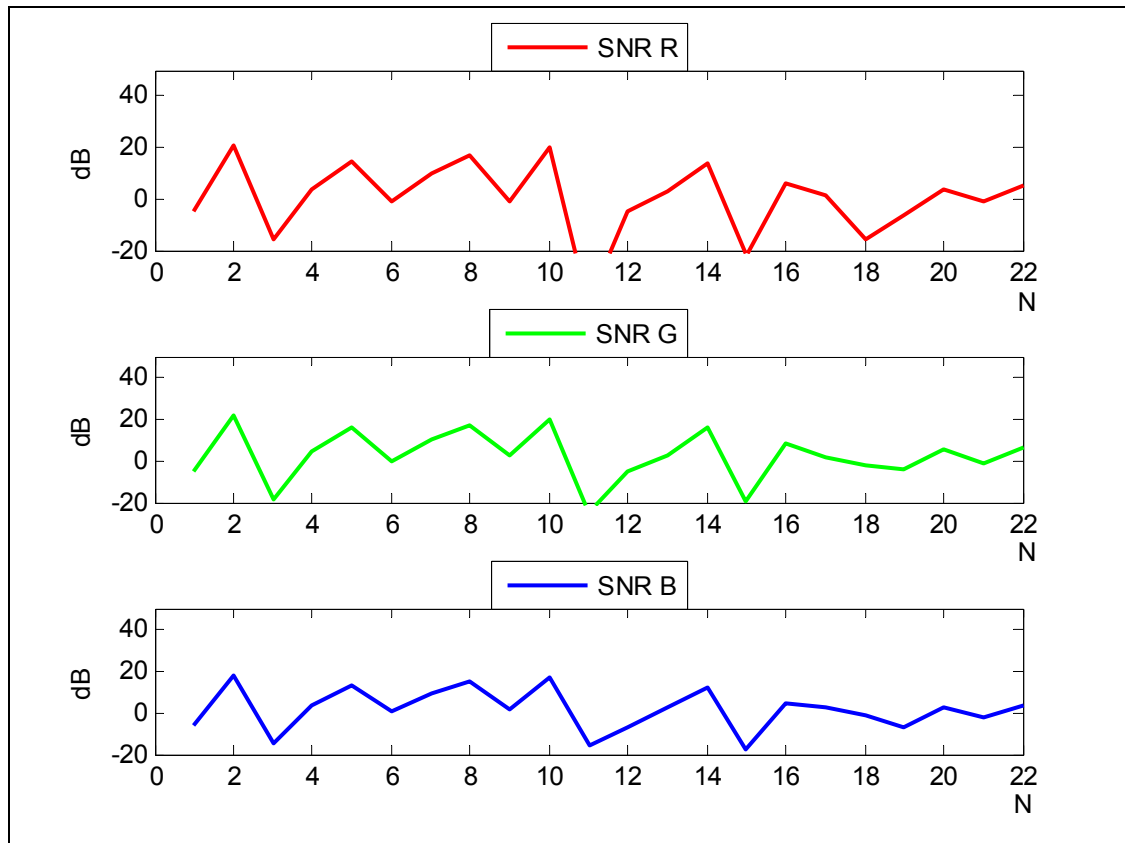
Grafik 90: Lichtfarbe 3795_3797

Licht: Standort 1 / Kamera: Standort 5

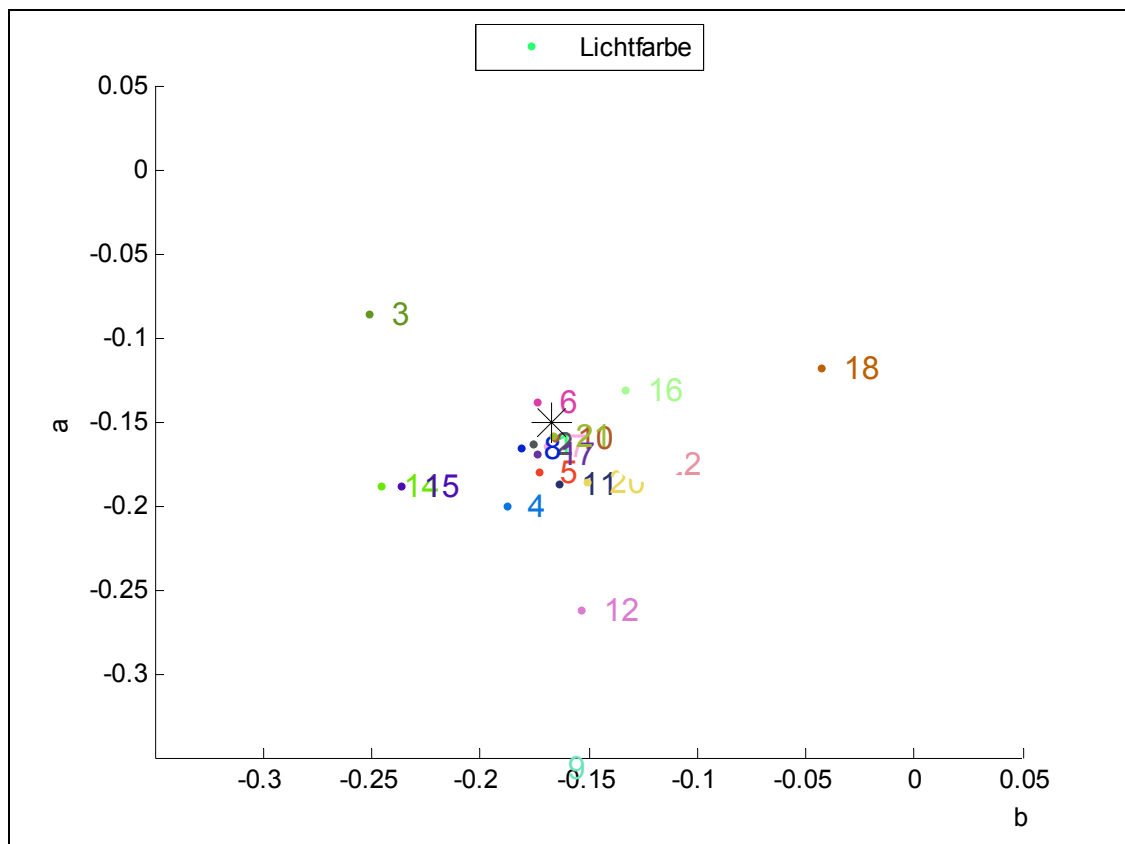
N-1 3801_3802 Szenenbeleuchtung und Deckenbeleuchtung



Grafik 91: 3801_3802



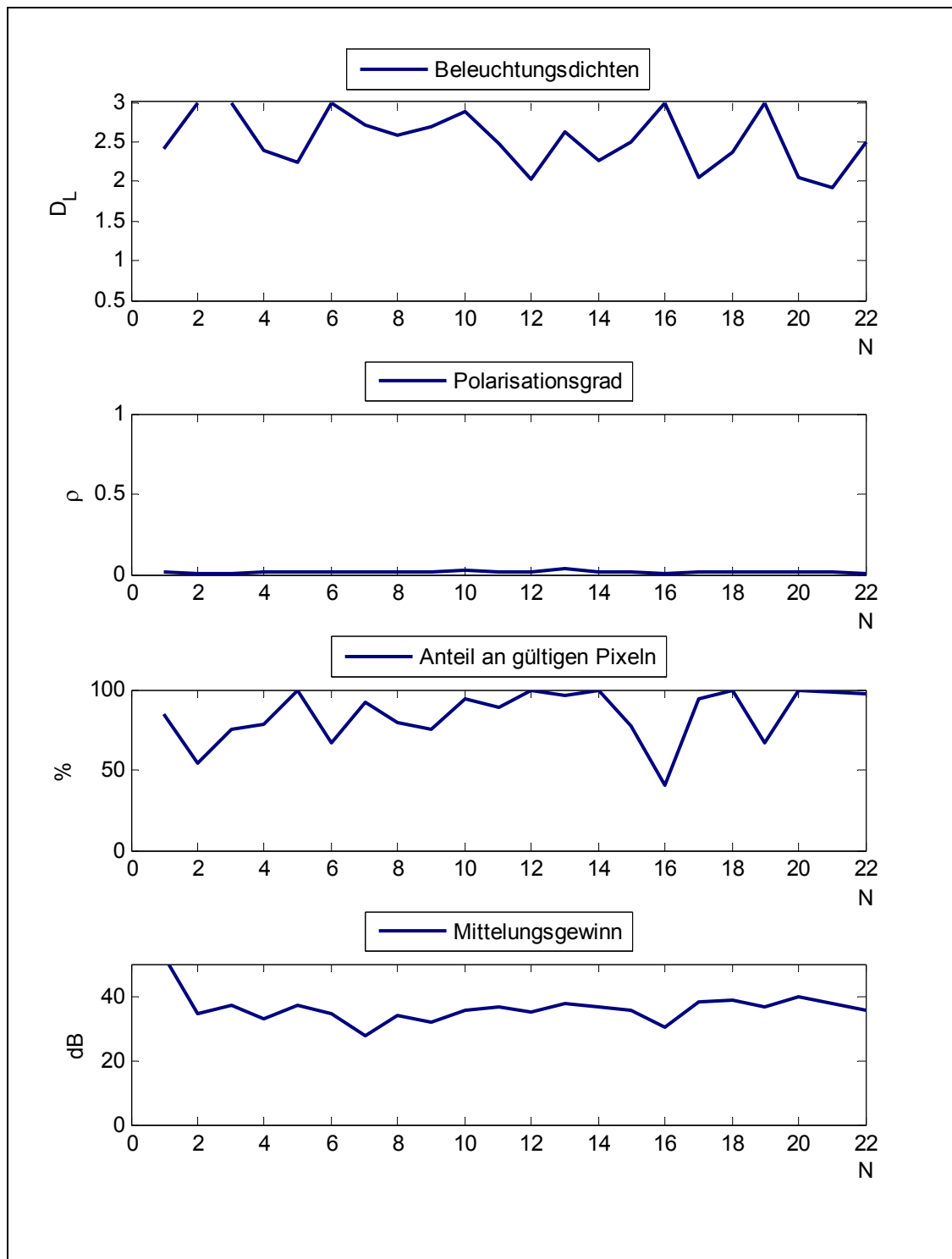
Grafik 92: SNR 3801_3802



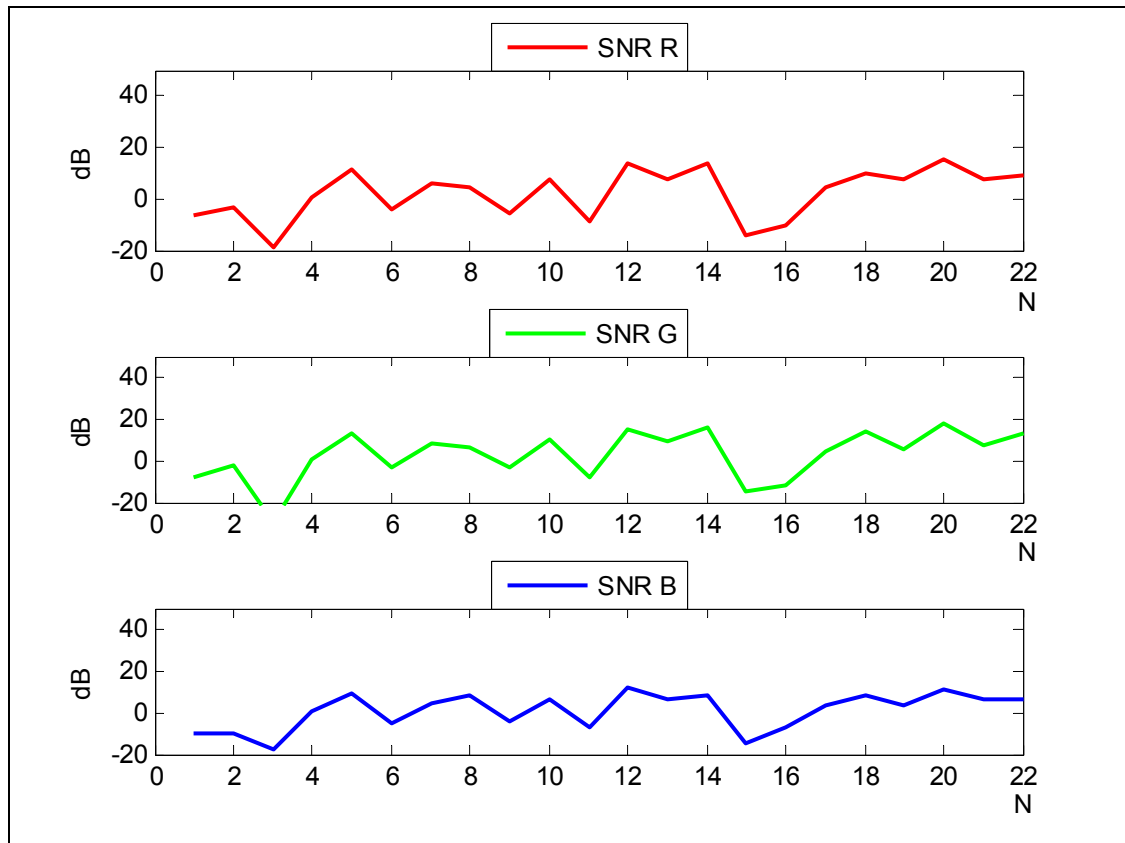
Grafik 93: Lichtfarbe 3801_3802

Licht: Standort 1 / Kamera: Standort 5

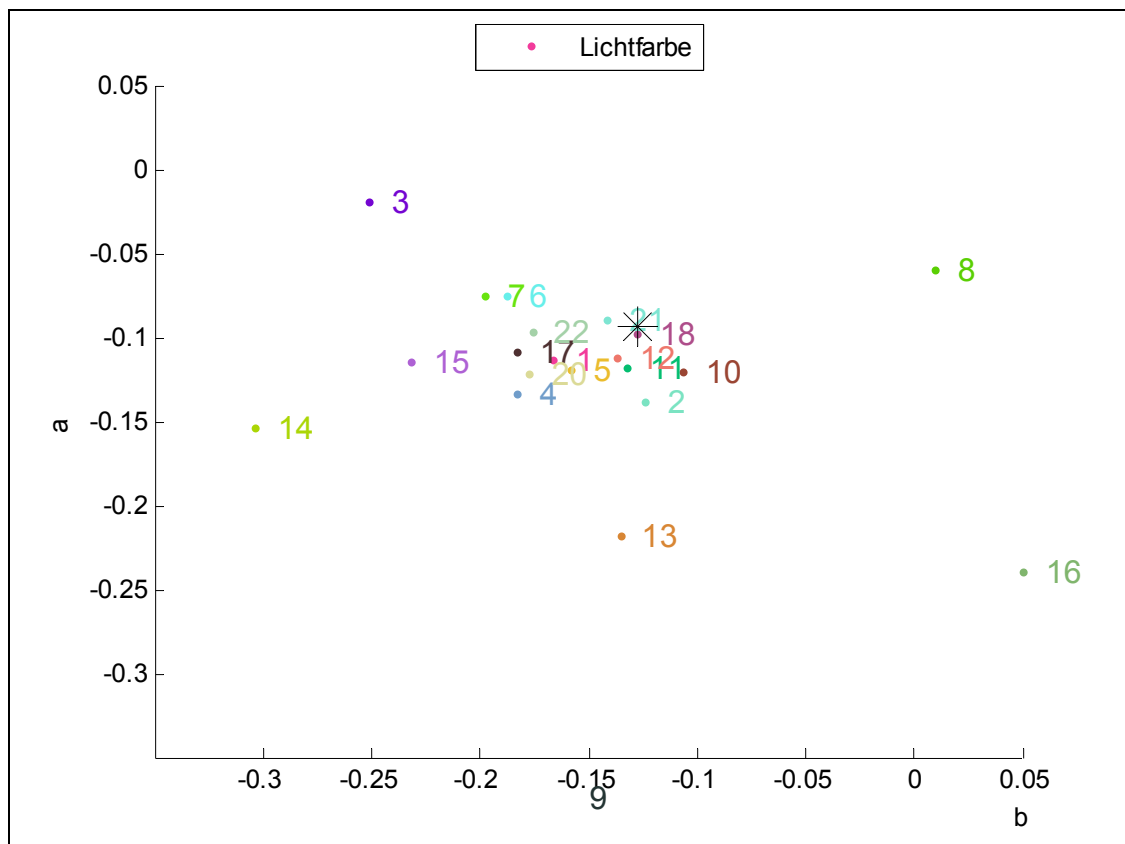
N-1 3807_3808 Deckenbeleuchtung



Grafik 94: 3807_3808



Grafik 95: SNR 3807_3808

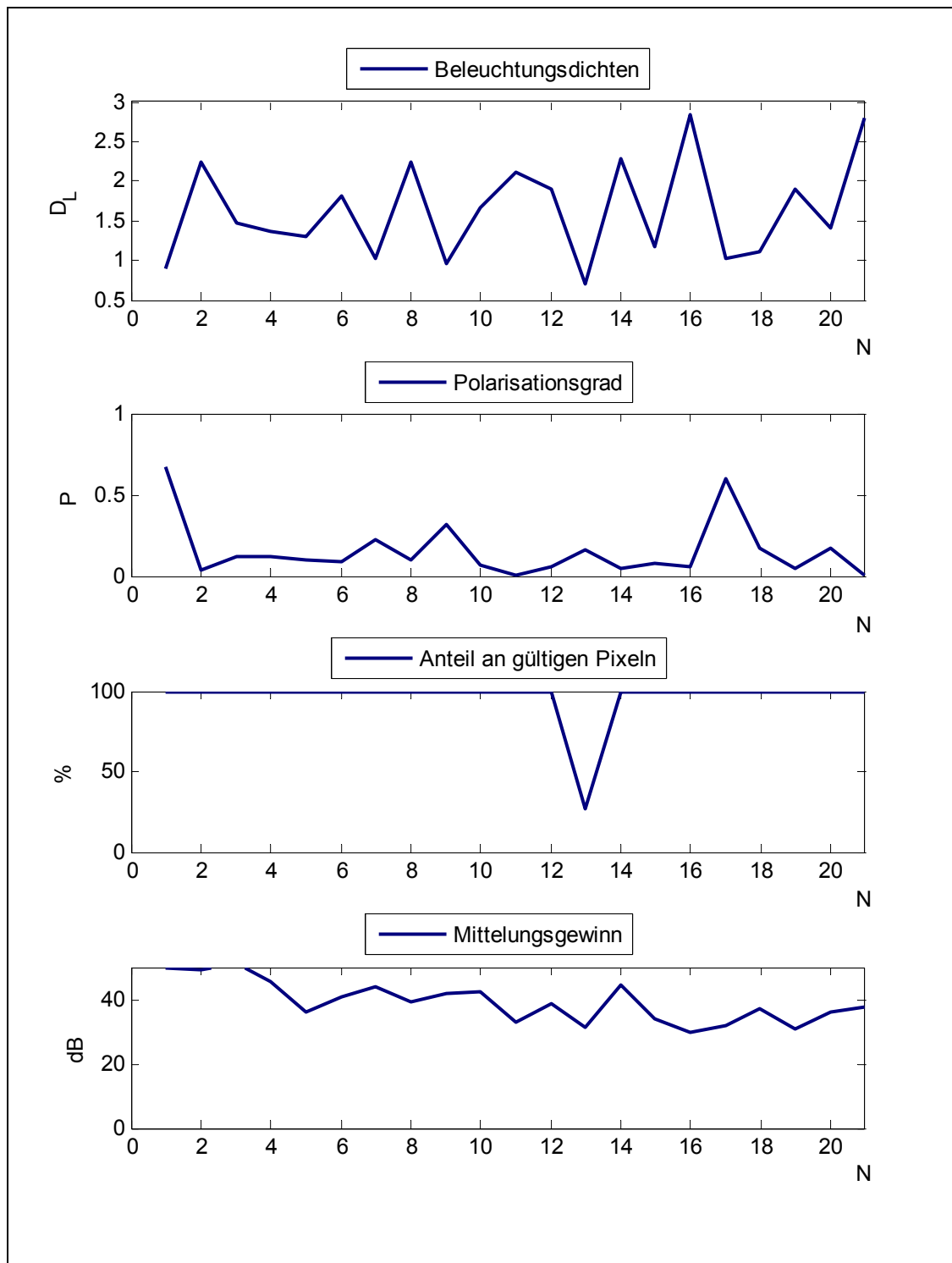


Grafik 96: Lichtfarbe 3807_3808

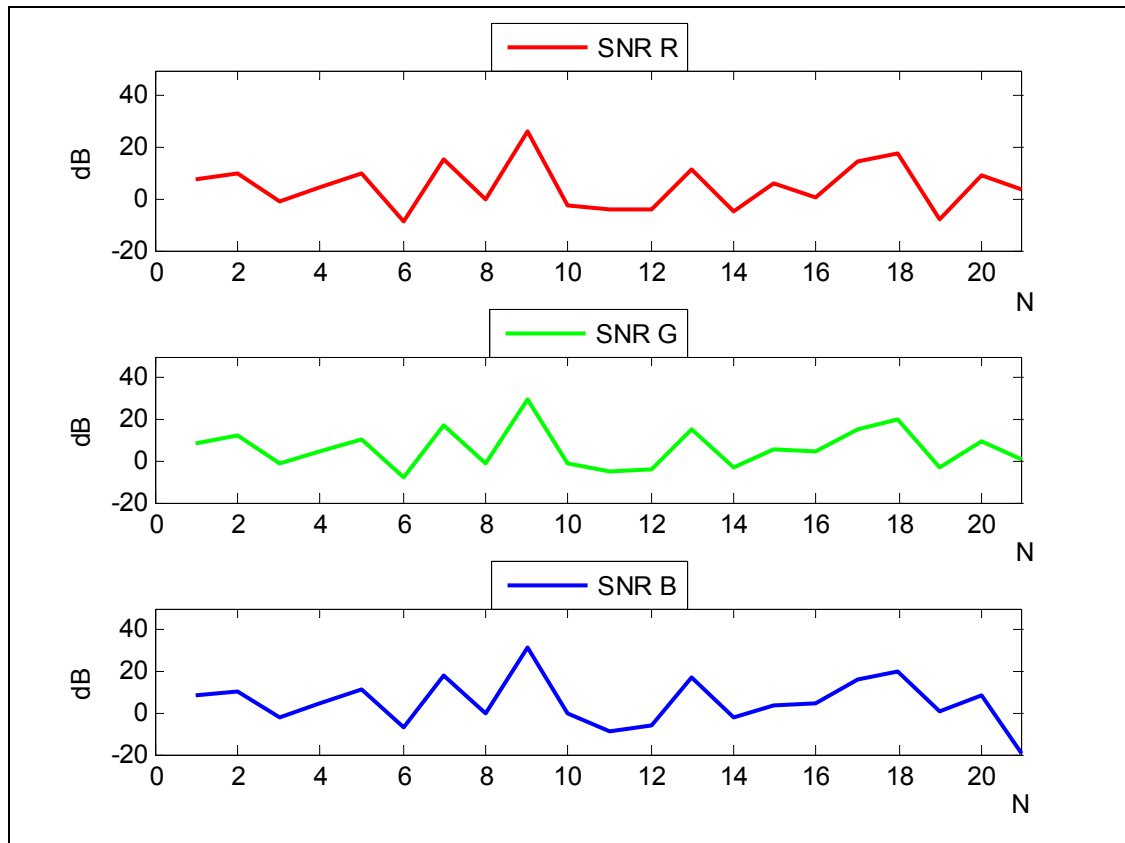
Außenaufnahmen bei direktem Sonnenlicht:

4628_4630, 4632_4634, 4644_4646, 4649_4651, 4652_4654, 4656_4658, 4660_4662,
4664_4666

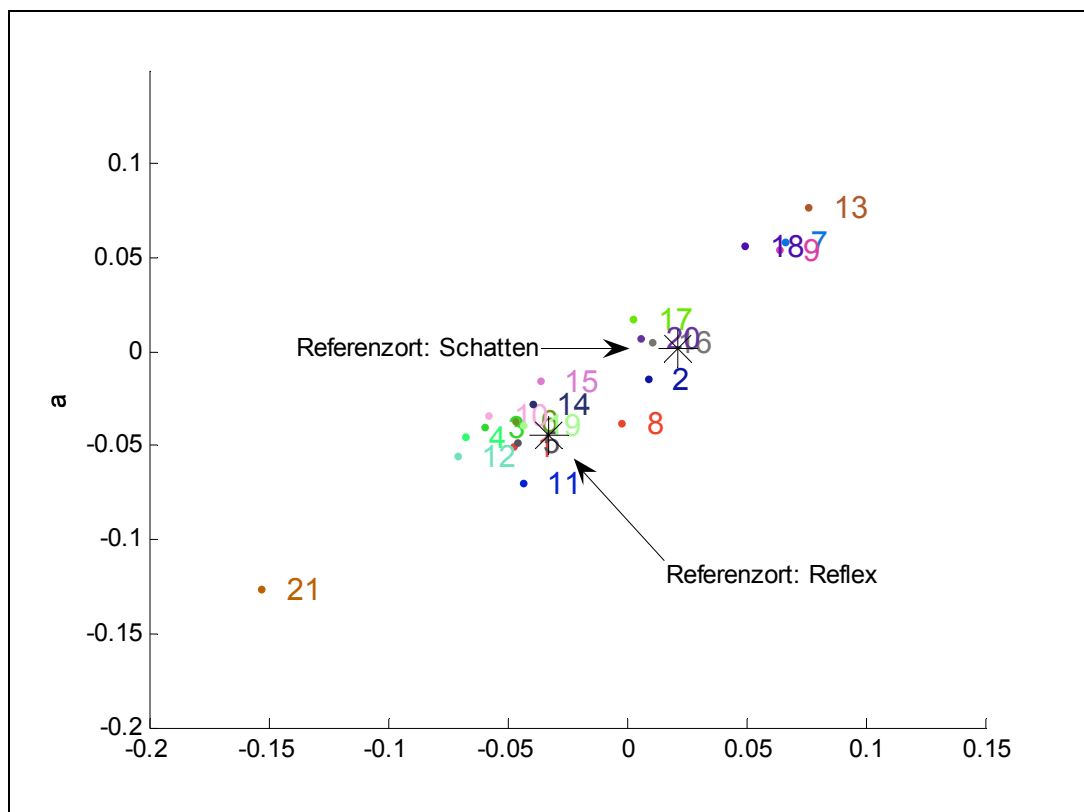
In den Grafiken sind alle Testflächen in direktem Sonnenlicht nebeneinander dargestellt. Die zugehörigen Bildausschnitte sind im Anschluss an die Grafiken in den entsprechenden Bildern eingezeichnet. Die Nummerierung der Bildausschnitte entspricht der Messfeldnummer in der Grafik.



Grafik 97: Außenaufnahmen bei direktem Sonnenlicht



Grafik 98: SNR der Außenaufnahmen bei direktem Sonnenlicht



Grafik 99: Lichtfarbe der Außenaufnahmen bei direktem Sonnenlicht

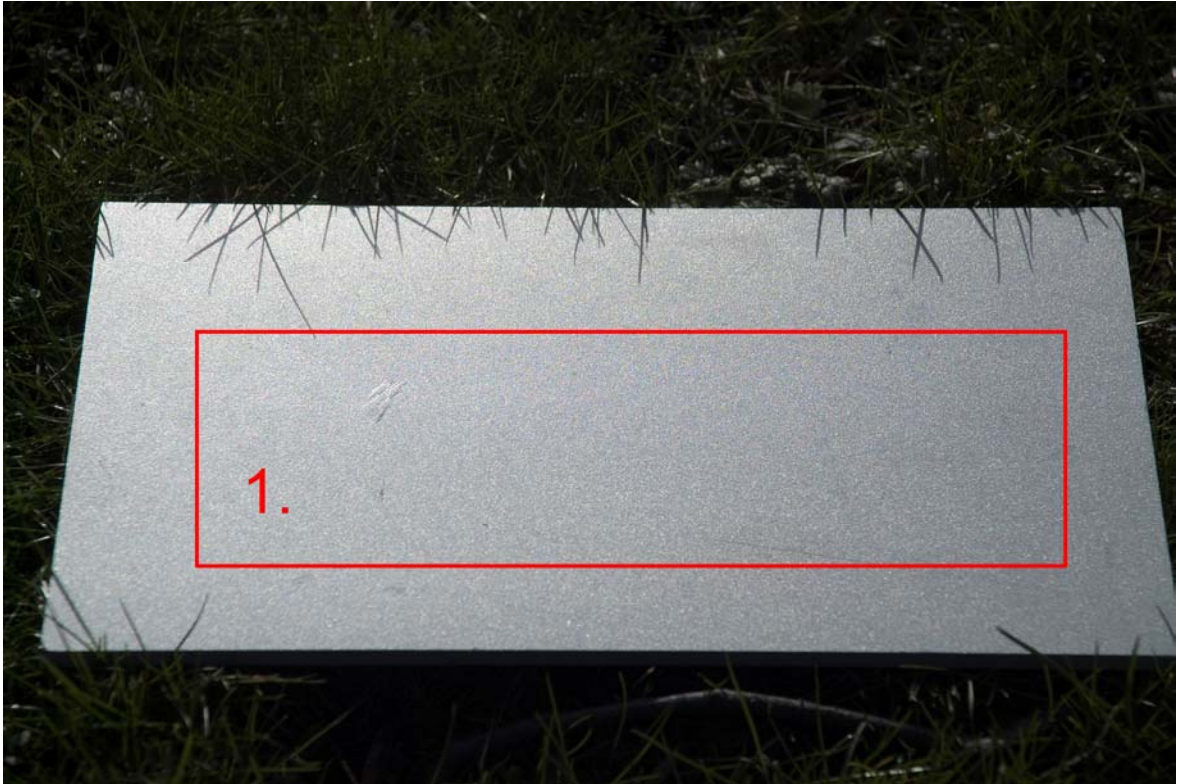


Abb. 65: 4628_4630



Abb. 66: 4632_4634



Abb. 67: 4644_4646

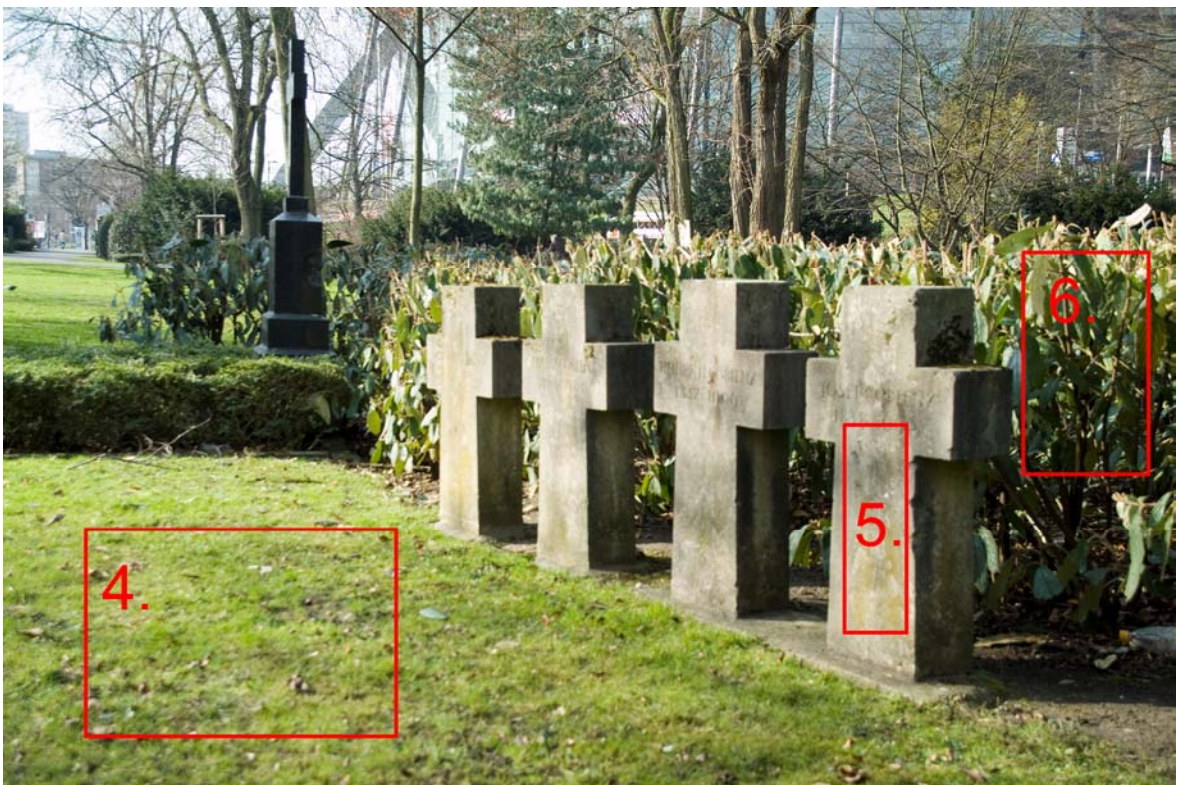


Abb. 68: 4649_4651



Abb. 69: 4652_4654

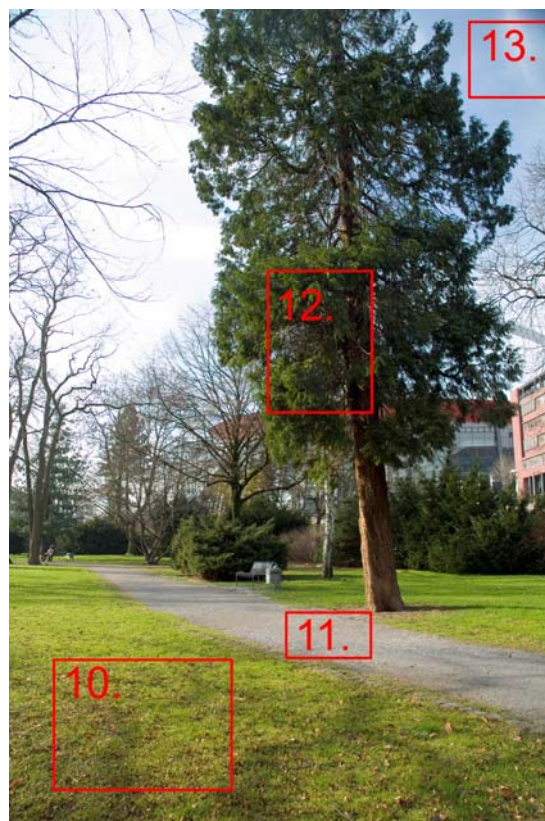


Abb. 70: 4656_4658

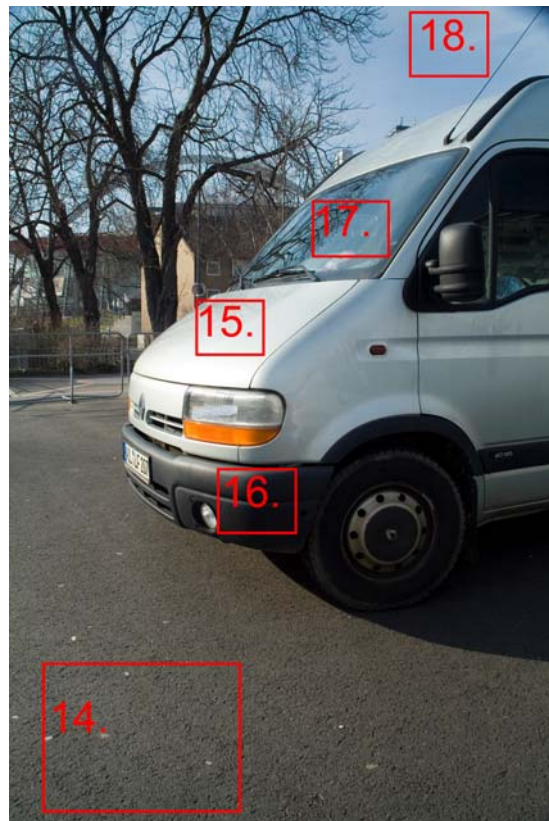


Abb. 71: 4660_4662

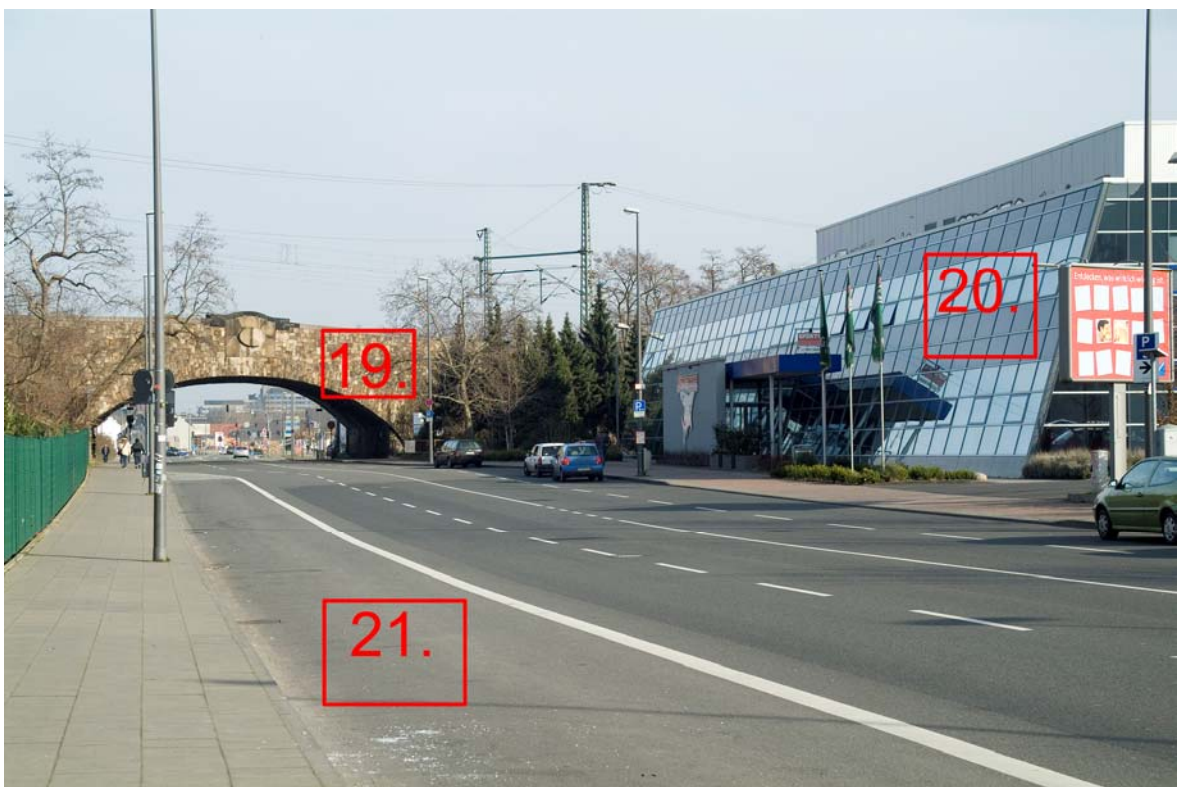
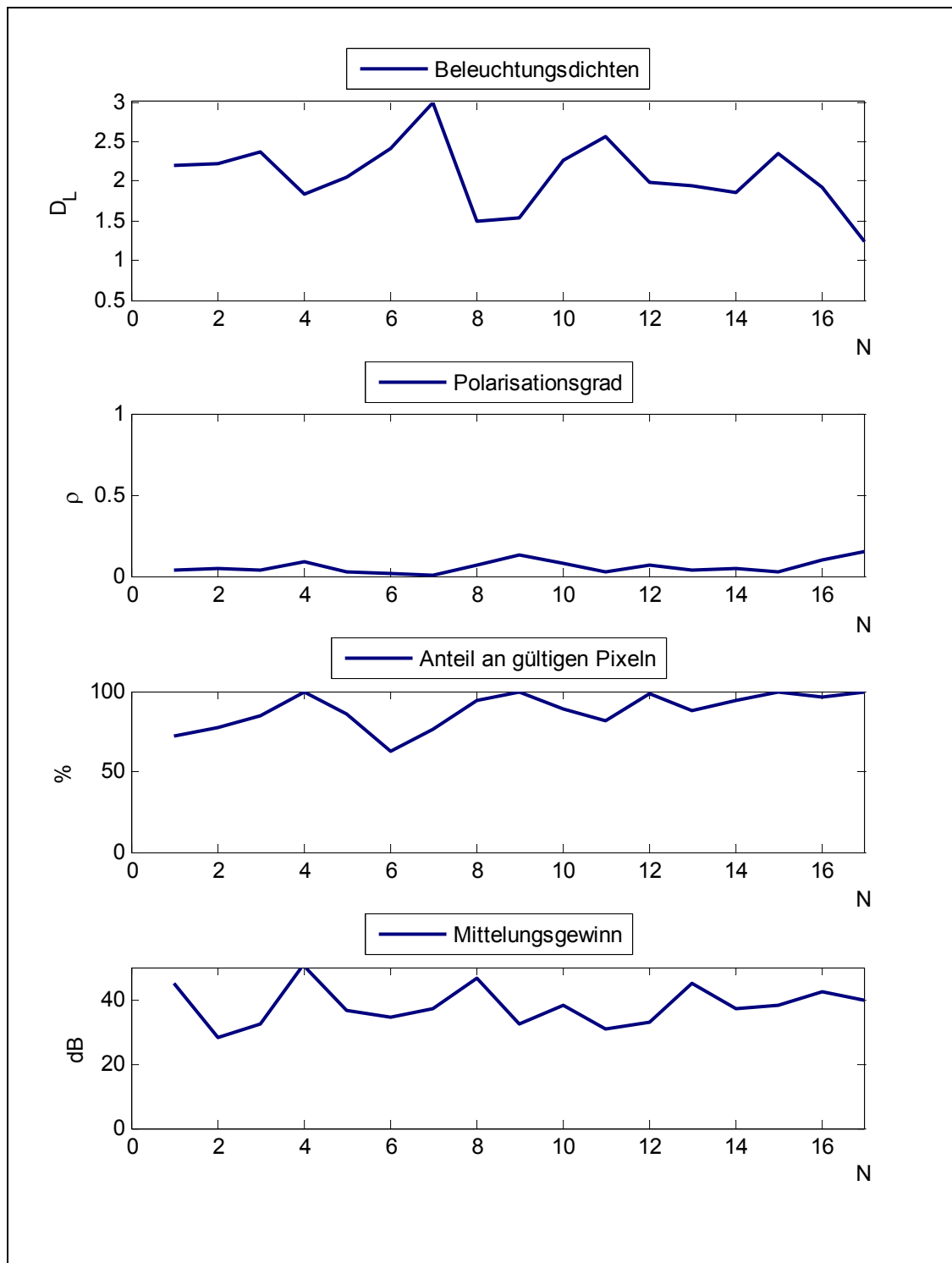


Abb. 72: 4664_4666

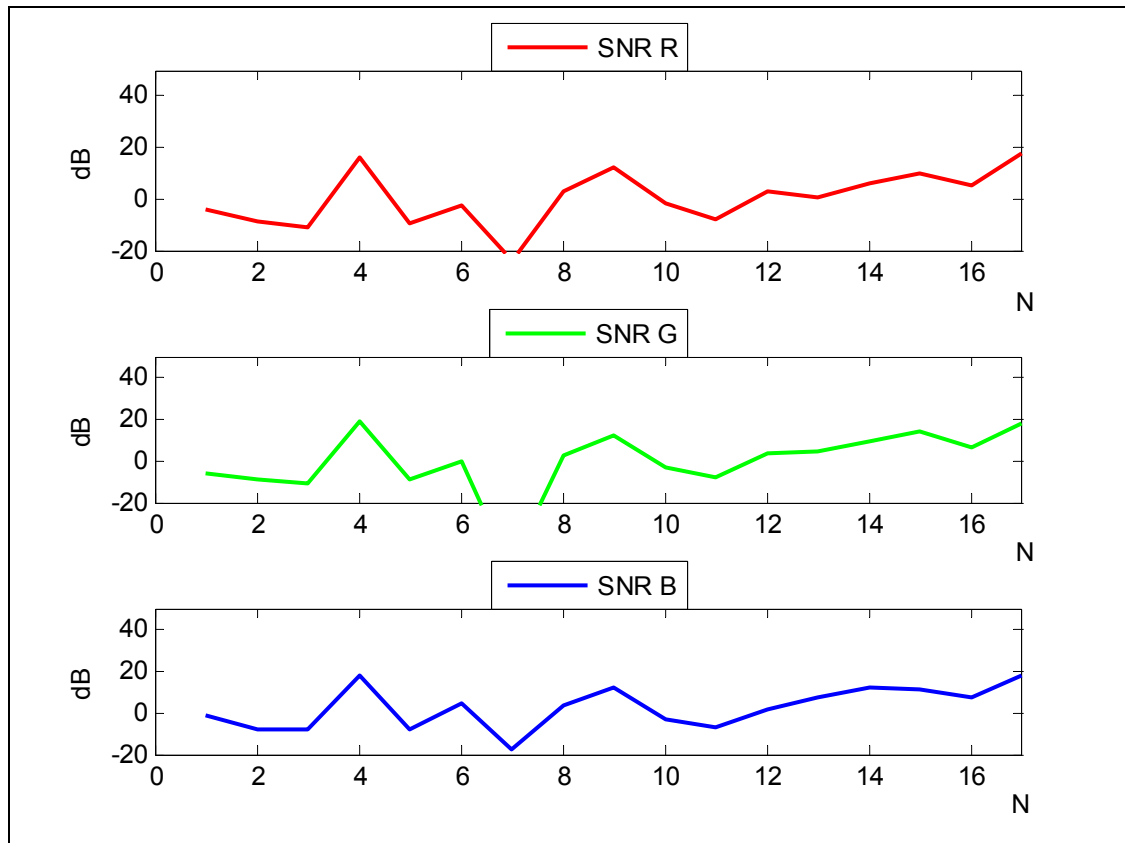
Außenaufnahmen bei indirektem Sonnenlicht:

4546_4548; 4551_4553; 4555_4557; 4559_4561; 4562_4564; 4569_4571; 4580_4582

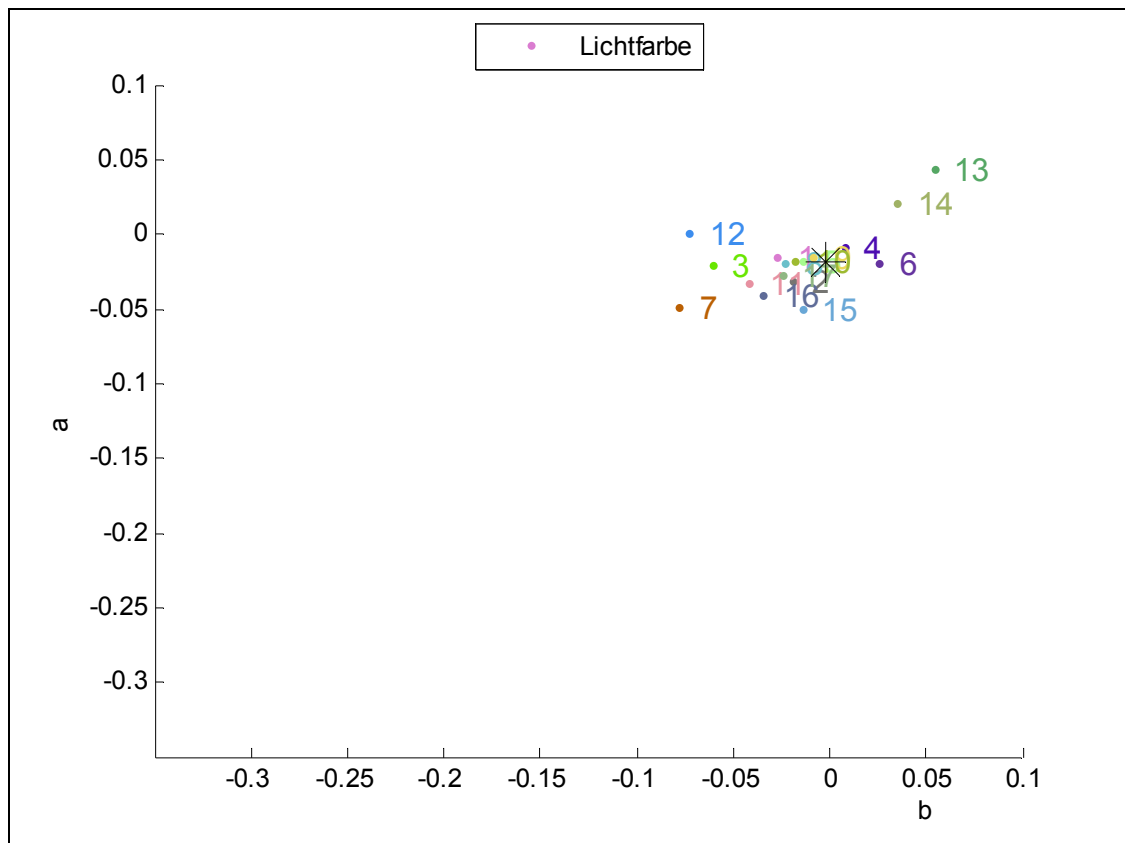
In den Grafiken sind alle Testflächen mit indirektem Sonnenlicht nebeneinander dargestellt. Die zugehörigen Bildausschnitte sind im Anschluss an die Grafiken in den entsprechenden Bildern eingezeichnet. Die Nummerierung der Bildausschnitte entspricht der Messfeldnummer in der Grafik



Grafik 100: Außenaufnahmen bei direktem Sonnenlicht



Grafik 101: SNR Außenaufnahmen bei indirektem Sonnenlicht



Grafik 102: Lichtfarbe der Außenaufnahmen bei indirektem Sonnenlicht

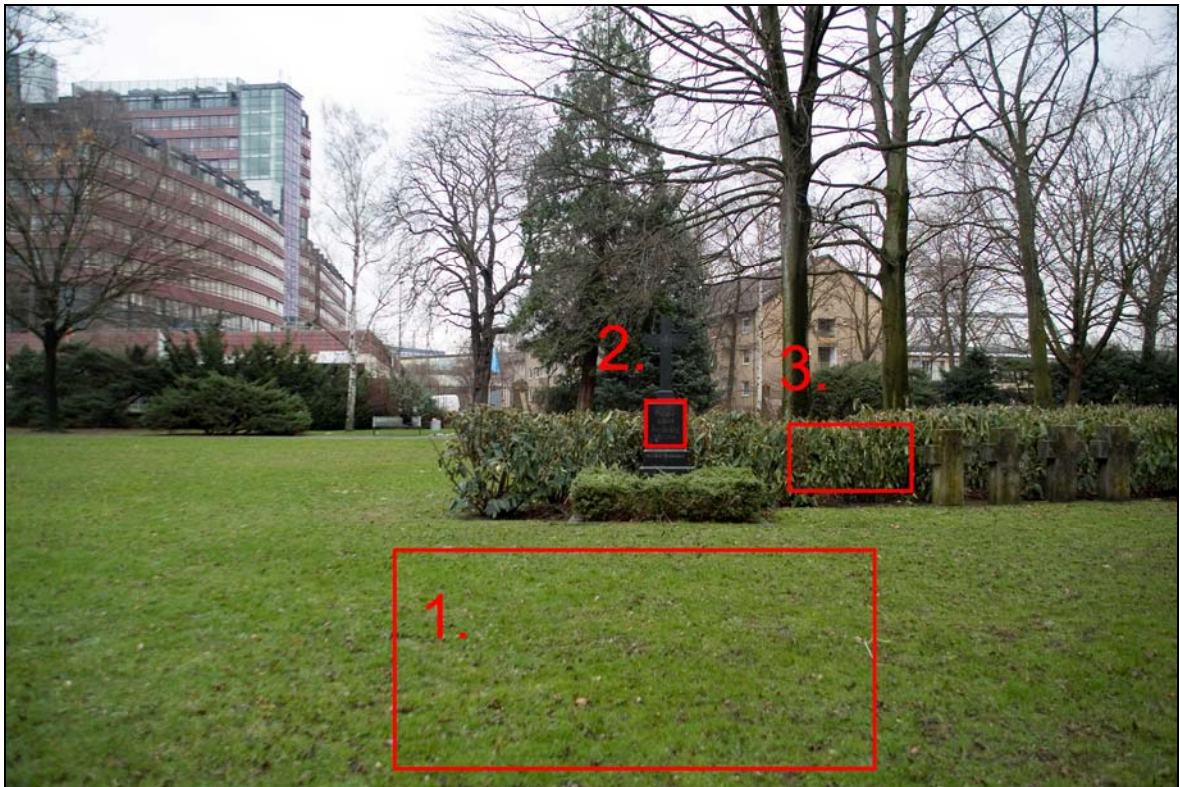


Abb. 73: 4546_4548

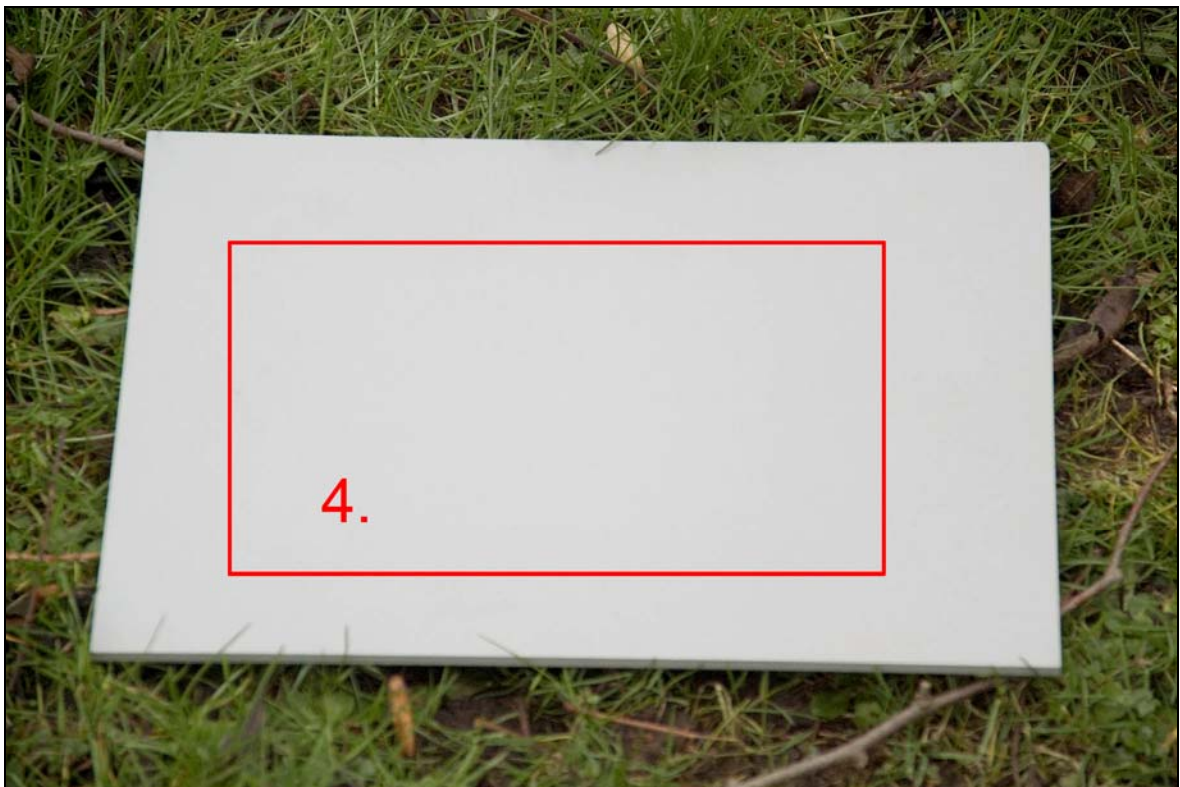


Abb. 74: 4551_4553



Abb. 75: 4555_4557

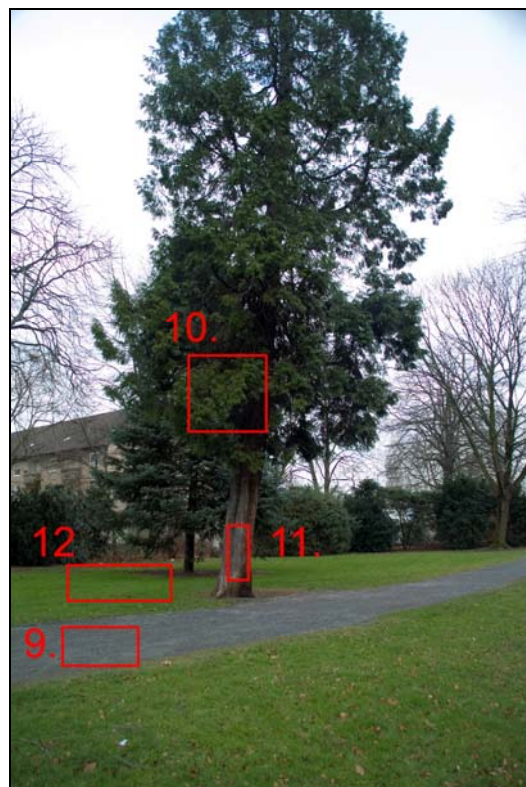


Abb. 76: 4559_4561



Abb. 77: 4562_4564

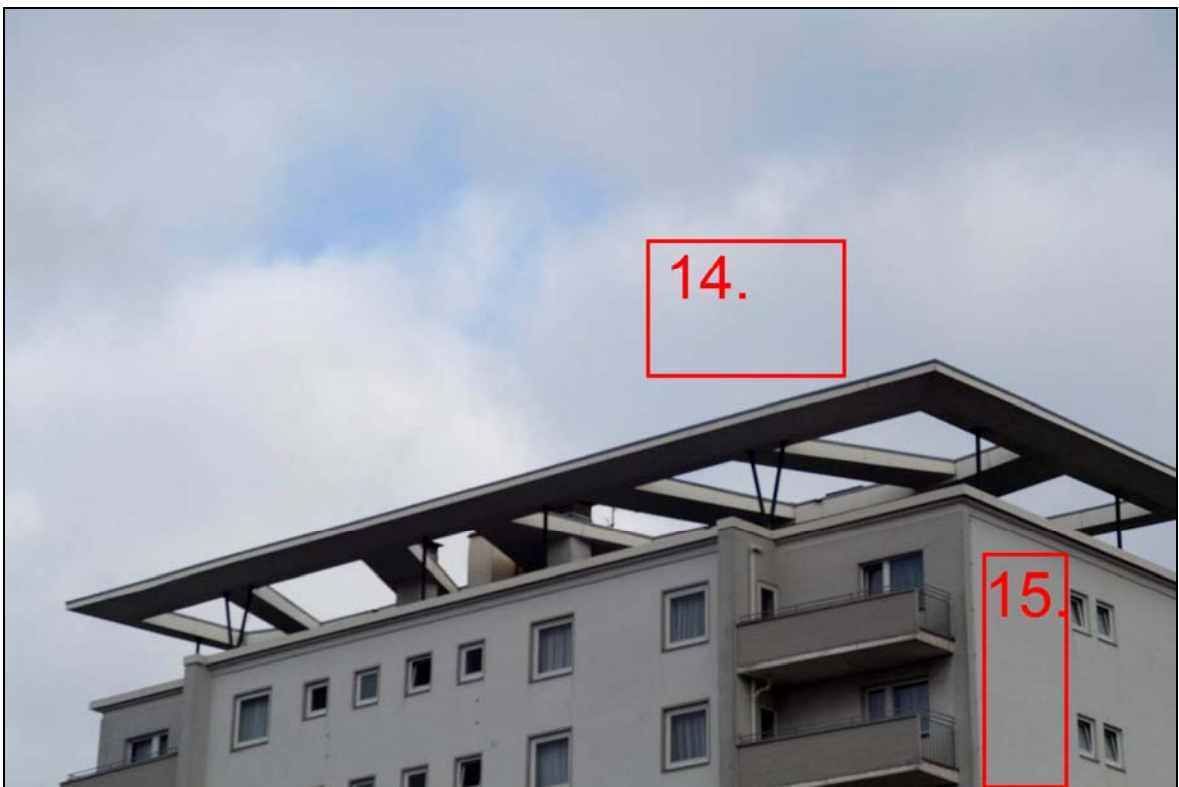


Abb. 78: 4569_4571



Abb. 79: 4580_4582

Literaturverzeichnis

- [1] Hecht, E.; Optik, 3. Auflage; Oldenbourg Verlag München Wien;
ISBN 9-783486-249170; S. 72f
- [2] Hecht, E.; Optik, 3. Auflage; Oldenbourg Verlag München Wien;
ISBN 9-783486-249170; S. 475
- [3] Hecht, E.; Optik, 3. Auflage; Oldenbourg Verlag München Wien;
ISBN 9-783486-249170; S. 475f
- [4] Bergmann, Schaefer; Lehrbuch der Experimentalphysik, Optik, Band 3, 9. Auflage;
Verlag Walter de Gruyter, Berlin New York, 1993; ISBN 3-11-012973-6; S.461
- [5] Prof. Dr. Fischer, G.; Phototechnik Vorlesung; 27.10.04
- [6] Pérez, J.-Ch; Optik; Spektrum Lehrbuch; ISBN 3-86025-389-1; S.324
- [7] Demtröder, W; Elementarphysik Bd.2, Elektrizität und Optik; Springer Lehrbuch; 1995;
ISBN 3-540-33794-6; S.240
- [8] Bergmann, Schaefer; Lehrbuch der Experimentalphysik, Optik, Band 3, 9. Auflage;
Verlag Walter de Gruyter, Berlin New York, 1993; ISBN 3-11-012973-6; S.458
- [9] Walcher, W; Praktikum der Physik; 4. Auflage; B.G. Teubner Stuttgart1979;
ISBN 3-519-33016-4, S. 188ff
- [10] Bergmann, Schaefer; Lehrbuch der Experimentalphysik, Optik, Band 3, 9. Auflage;
Verlag Walter de Gruyter, Berlin New York, 1993; ISBN 3-11-012973-6; S.243ff
- [11] Hecht, E.; Optik, 3. Auflage; Oldenbourg Verlag München Wien;
ISBN 9-783486-249170; S. 155f
- [12] Hecht, E.; Optik, 3. Auflage; Oldenbourg Verlag München Wien;
ISBN 9-783486-249170; S. 156
- [13] Walcher, W; Praktikum der Physik; 4. Auflage; B.G. Teubner Stuttgart1979;
ISBN 3-519-33016-4, S.188ff
- [14] Naumann, H., Schröder, G.; Bauelemente der Optik; 5. Auflage; Carl Hanser Verlag
München Wien; ISBN 3-446-14960-0
- [15] Lang H.; Farbwiedergabe in den Medien; Muster Schmidt Verlag, Göttingen, Zürich,
1995; 3-7881-4052-6 ; S.35f
- [16] Manfred Richter, Einführung in die Farbmeterik, 2. Auflage, deGruyter, Berlin NewYork,
1981; Seite 43f

- [17] Manfred Richter, Einführung in die Farbmatrik, 2. Auflage, deGruyter, Berlin NewYork, 1981; Seite 49
- [18] H.J.A. Dartnall, J.K. Bowmaker, J.D. Mollon, Microspectrophotometry of human photoreceptors, J.D. Mollon and L.T. Sharpe (editors) Colour Vision, Physiology and Psychophysics, pp.69-80, Academic Press, London, 1983.
- [19] Lang H.; Farbwiedergabe in den Medien; Muster Schmidt Verlag, Göttingen, Zürich, 1995; 3-7881-4052-6 ; S.140
- [20] Goldstein, E.W.; Wahrnehmungspsychologie: Farbwahrnehmung; Spektrum Akademischer Verlag 2002; ISBN 3-8274-1083-5 ; S.156 ff
- [21] Lang H.; Farbwiedergabe in den Medien; Muster Schmidt Verlag, Göttingen, Zürich, 1995; 3-7881-4052-6 ; S.45
- [22] Ramanath, R.; Snyder, W.; Bilbro, G.: Demosaicking methods for Bayer color arrays; Journal of Electronic Imaging 11(3), 306-315; 2002
- [23] Lang H.; Farbwiedergabe in den Medien; Muster Schmidt Verlag, Göttingen, Zürich, 1995; 3-7881-4052-6 ; S.22 f
- [24] Buchsbaum, G.; "A Spatial Processor Model for Object Color Perception," *Journal of Franklin Institute*, Vol. 310, S. 1-26, 1980.
- [25] Cardei, V.; Funt, B.; Barnard, K.: White Point Estimation for Uncalibrated Images, Proceedings of the seventh IS&T/SID Color Imaging Conference, p. 97-100, 1999
- [26] Land, E. H.; "The Retinex Theory of Color Vision," *Scientific American*, pp. 108-129, 1977.
- [27] Fischer, G.; Weißabgleich durch polarisierte Reflexe: Möglichkeiten der Realisierung
- [28] Burger, W., Burge M.J.; Diegitale Bildverarbeitung; Springer-Verlag Berlin Heidelberg; ISBN 9-783540-309406; 2. Auflage; 2005; S. 57
- [29] <http://www.fujifilm.de/>
- [30] ISO/WD 17321, Graphic Technology and Photography –colour characterization of digital still cameras (DSCs), ISO, Geneva, 2002; <http://www.pima.net/standards/iso/tc42/>
- [31] <http://cybercom.net/~dcoffin/dcraw>

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Orientierungen einer transversalen elektromagnetischen Welle	4
Abb. 2 Überlagerung zweier senkrecht zueinander schwingenden Felder E_x und E_y	5
Abb. 3: Polarisierung durch Reflexion	6
Abb. 4: Reflexionsgrade r_s für die senkrechte und r_p für die parallele Polarisationsrichtung	7
Abb. 5: Schwingung in y-Richtung bewirkt Abstrahlung in x-Richtung	8
Abb. 6: Polarisierung durch Absorption	8
Abb. 7: Polarisationsfolie	9
Abb. 8: Darstellung zum Photometrisches Grundgesetz	11
Abb. 9: Absorption und Remission	11
Abb. 10: Einfallsebene	12
Abb. 11: Gerichtete Reflexion	12
Abb. 12: Diffuse Reflexion	13
Abb. 13: Spektrum der elektromagnetischen Strahlung	15
Abb. 14: Frequenzspektrum des Schwarzen Strahlers	16
Abb. 15: Bildaufzeichnung des Auges	18
Abb. 16: Spektrale Empfindlichkeit von Stäbchen und Zapfen beim Menschen	19
Abb. 17: Bildaufzeichnung einer Digitalkamera	20
Abb. 18: Spektrale Empfindlichkeit eines CCD-Sensors	21
Abb. 19: Balancieren der R-,G- und B-Kanäle eines neutralen Bildpunktes	23
Abb. 20: Verschiedene Polfilterstellungen	25
Abb. 21: Schema des Verfahrens zur Bestimmung der beleuchtenden Lichtfarbe	28
Abb. 22: Zwei unter verschiedenen Polarisationsrichtungen entstandene Bilder	28
Abb. 23: Auswirkung der Schwellwertoperation	29
Abb. 24: Durch Differenzbildung entstandenes Beleuchtungsbild	30
Abb. 25: Logarithmiertes Beleuchtungsbild	30
Abb. 26: Maskenbild mit ungültigen schwarzen Pixeln und gültigen weißen Pixeln	31
Abb. 27: Histogramm mit Häufungspunkt	32
Abb. 28: Wichtung des Weißabgleichs	33
Abb. 29: Verschiebung des Mittelwertes durch Schwellwertoperation	33
Abb. 30: Darstellung der berücksichtigten Farborte	34
Abb. 31: Gegenüberstellung von unkorrigiertem und korrigiertem Rohdaten-Bild	35
Abb. 32: Spiegelmodell	36
Abb. 33: Gestreute Reflexion mit Reflexionsmaximum	37
Abb. 34: Senkrecht zueinander ausgerichtete Polfilterstellungen	40
Abb. 35: Versuchsaufbau im Studio	42
Abb. 36: Schwenken der Objektebene zur Veränderung der Oberflächenreflexion	43
Abb. 37: Testchart im Versuchsaufbau	45
Abb. 38: Testchart mit klassifizierten Testoberflächen	45
Abb. 39: Im Versuch verwendete Polfilterstellungen	48
Abb. 40: GetImageInformation und AnalyseImageInformation	50
Abb. 41: Dateistruktur von mySaveData.mat	52
Abb. 42: Dateistruktur von mySaveAnalyseData.mat	53
Abb. 43: Lichtfarbe	55
Abb. 44: Beleuchtungsichten	56
Abb. 45: Signal-Rausch-Verhältnis der Farbkanäle R, G, B	57
Abb. 46: Polarisationsgrad	58
Abb. 47: Anteil an gültigen Pixeln	59

Abb. 48: Mittelungsgewinn	60
Abb. 49: Farbveränderung in 0,02er Schritten	62
Abb. 50: 3696_3698; Histogramme der grauen Pappe an Position 1	64
Abb. 51: Versuchsaufbau mit verschwenkter Objektebene	69
Abb. 52: Untersuchung des Spiegelmodells	71
Abb. 53: Aufbau (1.) Einfallswinkel = Ausfallswinkel;	71
Abb. 54: Tatsächliche Transmissionsrichtung des verwendeten Filters	75
Abb. 55: 3724_3726; Detail des Referenzortes	79
Abb. 56: 3721_3723; Farborte der Keramikachel (links), des Styropors (rechts)	82
Abb. 57: 3727_3729; Farborten der schwarzen Pappe (links), des Gras (rechts)	83
Abb. 58: 3789_3791; Histogramme der Messfelder Gras (re.), Wolle (mi.) und Samt (li.)	87
Abb. 59: Polarisierungseffekt der Remission	88
Abb. 60: 3795_3797; Farborte der Graukarte mit Szenenbeleuchtung	91
Abb. 61: 3807_3808; Farborte der Graukarte mit Deckenbeleuchtung	92
Abb. 62: 3801_3802; Farborte mit Szenenbeleuchtung + Deckenbeleuchtung	93
Abb. 63: Farborte mit Reflex (links); Farborte der Graukarte im Schatten (rechts)	95
Abb. 64: Positionen im Versuchsaufbau	103
Abb. 65: 4628_4630	154
Abb. 66: 4632_4634	154
Abb. 67: 4644_4646	155
Abb. 68: 4649_4651	155
Abb. 69: 4652_4654	156
Abb. 70: 4656_4658	156
Abb. 71: 4660_4662	157
Abb. 72: 4664_4666	157
Abb. 73: 4546_4548	161
Abb. 74: 4551_4553	161
Abb. 75: 4555_4557	162
Abb. 76: 4559_4561	162
Abb. 77: 4562_4564	163
Abb. 78: 4569_4571	163
Abb. 79: 4580_4582	164

Grafiken

Grafik 1: 3696_3698; Minimaler Polarisationsgrad	64
Grafik 2: 3773_3775; Maximaler Polarisationsgrad	65
Grafik 3: 3696_3698; Gestreute Anordnung der Farborte bei Position 1	66
Grafik 4: 3789_3791; Wolkenförmige Anordnung der Farborte bei Position 5	67
Grafik 5: 3751_3753; Variante 1	70
Grafik 6: 3757_3759; Variante 2	70
Grafik 7: 3764_3766; Variante 3	70
Grafik 8: 3789_3791; Vergleich Variante 3	72
Grafik 9: 3773_3774	74
Grafik 10: 3773_3775	74
Grafik 11: 3774_3775	74
Grafik 12: Lichtfarbe 3773_3774	76
Grafik 13: Lichtfarbe 3774_3775	76
Grafik 14: Lichtfarbe 3696_3698	78
Grafik 15: Lichtfarbe 3757_3759; Spiegelbild zeigt Raumlicht	80
Grafik 16: 3786_3788	82
Grafik 17: 3727_3729; Polarisationsgrad	83
Grafik 18: Lichtfarbe 3792_3794	84
Grafik 19: 3773_3774	85
Grafik 20: 3789_3791	86
Grafik 21: Lichtfarbe 3789_3791	87
Grafik 22: Lichtfarbe 3757_3759; Glänzendes Photo (15) und Keramikkachel (20) zeigen spektrale Eigenschaften des Objektes	90
Grafik 23: Lichtfarbe der Außenaufnahmen bei direktem Sonnenlicht	94
Grafik 24: Polarisationsgrad der Außenaufnahmen bei direktem Sonnenlicht	95
Grafik 25: Lichtfarbe der Außenaufnahmen bei indirektem Sonnenlicht	96
Grafik 26: Außenaufnahmen bei direktem Sonnenlicht	97
Grafik 27: Außenaufnahmen bei indirektem Sonnenlicht	97
Grafik 28: 3696_3698	105
Grafik 29: SNR 3696_3698	106
Grafik 30: Lichtfarbe 3696_3698	106
Grafik 31: 3724_3726	107
Grafik 32: SNR 3724_3726	108
Grafik 33: Lichtfarbe 3724_3726	108
Grafik 34: 3751_3753	109
Grafik 35: SNR 3751_3753	110
Grafik 36: Lichtfarbe 3751_3753	110
Grafik 37: 3773_3775	111
Grafik 38: SNR 3773_3775	112
Grafik 39: Lichtfarbe 3773_3775	112
Grafik 40: 3789_3791	113
Grafik 41: SNR 3789_3791	114
Grafik 42: Lichtfarbe 3789_3791	114
Grafik 43: 3757_3759	115
Grafik 44: SNR 3757_3759	116
Grafik 45: Lichtfarbe 3757_3759	116
Grafik 46: 3764_3766	117

Grafik 47: SNR 3764_3766.....	118
Grafik 48: Lichtfarbe 3764_3766.....	118
Grafik 49: 3773_3774.....	119
Grafik 50: SNR 3773_3774.....	120
Grafik 51: Lichtfarbe 3773_3774.....	120
Grafik 52: 3773_3775.....	121
Grafik 53: SNR 3773_3775.....	122
Grafik 54: Lichtfarbe 3773_3775.....	122
Grafik 55: 3774_3775.....	123
Grafik 56: 3774_3775.....	124
Grafik 57: Lichtfarbe 3774_3775.....	124
Grafik 58: 3693_3695.....	125
Grafik 59: SNR 3693_3695.....	126
Grafik 60: Lichtfarbe 3693_3695.....	126
Grafik 61: 3721_3723.....	127
Grafik 62: SNR 3721_3723.....	128
Grafik 63: Lichtfarbe 3721_3723.....	128
Grafik 64: 3748_3750.....	129
Grafik 65: SNR 3748_3750.....	130
Grafik 66: Lichtfarbe 3748_3750.....	130
Grafik 67: 3770_3772.....	131
Grafik 68: SNR 3770_3772.....	132
Grafik 69: Lichtfarbe 3770_3772.....	132
Grafik 70: 3786_3788.....	133
Grafik 71: SNR 3789_3791.....	134
Grafik 72: Lichtfarbe 3789_3791.....	134
Grafik 73: 3700_3702.....	135
Grafik 74: SNR 3700_3702.....	136
Grafik 75: Lichtfarbe 3700_3702.....	136
Grafik 76: 3727_3729.....	137
Grafik 77: SNR 3727_3729.....	138
Grafik 78: Lichtfarbe 3727_3729.....	138
Grafik 79: 3754_3756.....	139
Grafik 80: SNR 3754_3756.....	140
Grafik 81: Lichtfarbe 3754_3756.....	140
Grafik 82: 3777_3779.....	141
Grafik 83: SNR 3777_3779.....	142
Grafik 84: Lichtfarbe 3777_3779.....	142
Grafik 85: 3792_3794.....	143
Grafik 86: SNR 3792_3794.....	144
Grafik 87: Lichtfarbe 3792_3794.....	144
Grafik 88: 3795_3797.....	145
Grafik 89: SNR 3795_3797.....	146
Grafik 90: Lichtfarbe 3795_3797.....	146
Grafik 91: 3801_3802.....	147
Grafik 92: SNR 3801_3802.....	148
Grafik 93: Lichtfarbe 3801_3802.....	148
Grafik 94: 3807_3808.....	149
Grafik 95: SNR 3807_3808.....	150
Grafik 96: Lichtfarbe 3807_3808.....	150

Grafik 97: Außenaufnahmen bei direktem Sonnenlicht	152
Grafik 98: SNR der Außenaufnahmen bei direktem Sonnenlicht	153
Grafik 99: Lichtfarbe der Außenaufnahmen bei direktem Sonnenlicht	153
Grafik 100: Außenaufnahmen bei direktem Sonnenlicht	159
Grafik 101: SNR Außenaufnahmen bei indirektem Sonnenlicht	160
Grafik 102: Lichtfarbe der Außenaufnahmen bei indirektem Sonnenlicht	160